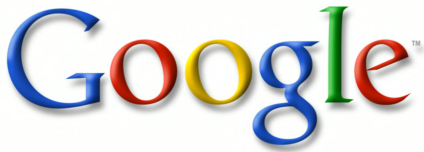








LE

SOLEIL.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

LE

SOLEIL.

EXPOSÉ DES PRINCIPALES DÉCOUVERTES MODERNES
SUR LA STRUCTURE DE CET ASTRE, SON INFLUENCE DANS L'UNIVERS
ET SES RELATIONS AVEC LES AUTRES CORPS CÉLESTES,

PAR LE P. A. SECCHI, S. J.,
Directeur de l'Observatoire du Collége Romain, Officier de la Légion d'honneur,
Correspondant de l'Institut impérial de France, etc.





PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1870

INTRODUCTION.

Qu'est-ce que le Soleil? Quel est cet astre radieux et puissant qui dissipe les ténèbres de la nuit, apporte sur la Terre la lumière du jour, qui nous inonde de chaleur, de lumière et de vie, en même temps que par son attraction mystérieuse il retient autour de lui le système des planètes, contribuant ainsi d'une manière active à maintenir l'ordre dans la création? Telle est la question que se pose tout homme qui aime à réfléchir sur les grands phénomènes de la nature, au lieu d'imiter les êtres sans raison qui se nourrissent des fruits qu'ils rencontrent sur le sol sans jamais élever leurs regards vers l'arbre qui les produit.

Plusieurs peuples de l'antiquité adoraient le Soleil, erreur moins humiliante peut-être que beaucoup d'autres, car cet astre est l'image la plus parfaite de la Divinité, l'instrument dont se sert le Créateur pour nous communiquer presque tous ses bienfaits dans l'ordre physique. Bien qu'à nos yeux il ne soit plus qu'une simple créature, son étude est cependant l'une des plus relevées auxquelles puisse se livrer un savant, et l'histoire des conquêtes faites dans ce champ iné-

puisable sera toujours un des objets les plus dignes de notre attention et les plus capables de nous édifier.

Malheureusement, la science est loin d'être à la hauteur de son sujet. Ce ne sont ni les recherches, ni les spéculations qui font défaut; les difficultés inhérentes à la nature même de cette étude paralysent nos efforts, et malgré l'activité que nous déployons, *vincit natura latendi :* la nature veut encore rester cachée. Mais notre génération, qui a démenti ces paroles en découvrant les sources du Nil, réussira peut-être un jour à dérober au Soleil ces secrets qu'il cache si habilement, non en les enveloppant de ténèbres, mais en les éclairant d'une lumière éblouissante.

L'histoire nous apprend que toutes les découvertes de la science, tous les perfectionnements apportés aux méthodes d'observation ont été immédiatement appliqués à l'étude du Soleil; la Physique solaire a fait un pas en avant toutes les fois que la Physique générale a fait une conquête. La découverte des lunettes fit d'abord connaître son mouvement de rotation, l'existence, la structure, les variations de ses taches, et la manière dont la lumière est distribuée à sa surface. Ne manquons pas de signaler l'emploi des verres colorés qui suivit de près la découverte du télescope; c'est grâce à eux que le P. Scheiner put se livrer avec tant de fruit à une étude qui priva de la vue l'infortuné Galilée.

Ces premiers moyens d'observation eurent bientôt produit tout ce qu'on pouvait en attendre. Il en résulta un temps d'arrêt dans les progrès de nos connaissances et une indifférence profonde pour ce genre de recherches. On désespérait même de cette branche de l'Astronomie lorsque W. Herschel se mit à l'œuvre avec les instruments qu'il avait construits de ses propres mains. L'étude du Soleil fit avec lui de grands progrès, mais ses découvertes et ses méthodes lui restèrent personnelles comme ses instruments; il n'eut pas d'imitateurs, et après lui commença un second temps d'arrêt.

Cependant l'Optique faisait des progrès; les grands instruments devenaient plus nombreux et préparaient de nouvelles découvertes; mais ils ne faisaient que les préparer, car ces instruments si perfectionnés restèrent assez longtemps inutiles; c'est seulement de nos jours qu'on a trouvé des méthodes permettant d'employer à l'étude du Soleil les grossissements énormes auxquels se prêtent les plus grandes lunettes.

Mais ce qui a fait surtout avancer la Physique solaire, c'est le perfectionnement de la théorie mathématique des mouvements célestes. Lorsque, dans le calcul d'une éclipse, on fut parvenu à déterminer d'une manière précise les lieux où devait passer la ligne centrale de la totalité, alors seulement les astronomes purent se réunir en grand nombre dans ces

lieux privilégiés, apportant avec eux des instruments de toute grandeur et de toute nature, ce qui leur a permis de faire les découvertes les plus inattendues.

La Photographie ne pouvait manquer de venir en aide à l'étude du Soleil : elle nous a fourni des dessins représentant avec la précision la plus absolue les taches avec tous leurs détails, et les différentes phases des éclipses; elle nous a rendu d'immenses services dans ces courts instants des éclipses totales où l'œil se trouve surpris et reste incertain; c'est elle qui nous a donné le moyen de résoudre en quelques instants des questions agitées depuis bien des années.

La persévérance avec laquelle on a observé les taches a permis de constater la périodicité de ce phénomène, et dans cette étude on a tiré un grand parti d'ouvrages autrefois décriés et tournés en ridicule, mais qui contenaient malgré cela des documents précieux. En comparant ces périodes des vicissitudes solaires avec d'autres phénomènes qui n'ont avec elles aucune relation apparente, on a pu établir que le Soleil n'agit pas seulement comme centre d'attraction et comme foyer de lumière, mais qu'il exerce une action incontestable sur les phénomènes magnétiques.

Enfin l'analyse spectrale a ouvert une immense carrière que nous aurions dû croire fermée pour toujours : elle nous a fait connaître la nature chimique des substances qui composent l'atmosphère solaire,

et même d'une manière approchée la température de cette atmosphère. On a pu ainsi faire l'analyse qualitative de l'astre du jour, et l'on a même appris tout récemment à étudier en tout temps certains phénomènes que nous ne pouvions autrefois observer que pendant les éclipses totales. C'est ainsi que la Chimie, à son tour, est venue en aide à l'Astronomie. La belle découverte de la dissociation et la théorie mécanique de la chaleur nous ont enfin montré en quoi consiste la puissance calorifique du Soleil, et nous ont expliqué comment cette puissance peut rester la même pendant tant de siècles, malgré le rayonnement continuel qui semble devoir l'appauvrir en peu de temps.

Dans l'état où se trouve actuellement la science, j'ai cru qu'il était temps de réunir en quelques pages l'ensemble de ces merveilleuses découvertes qui font tant d'honneur aux savants de notre époque, et qui ont l'avantage de joindre l'agréable à l'utile.

Afin de suivre l'ordre des idées, j'exposerai d'abord les travaux des anciens, mais brièvement, sans m'occuper de questions inutiles, ni de résultats hypothétiques. De plus, afin de rendre cet Ouvrage accessible à un plus grand nombre de personnes, j'entrerai quelquefois dans des détails qui ne seraient pas nécessaires pour des savants, mais qu'on me pardonnera en considération du but que je me suis proposé.

La contemplation des œuvres de Dieu est une des plus nobles occupations de l'esprit, c'est le but principal de l'étude de la nature; mais cette étude nous conduit souvent à des résultats utiles que nous ne saurions dédaigner. L'étude du Soleil ne paraît pas, pour le moment du moins, nous présenter cet avantage. Quelles que soient nos recherches et les connaissances que nous pourrons acquérir, il ne sera jamais en notre pouvoir de régler l'influence du Soleil. Cependant, l'action de cet astre est trop intimement liée avec les phénomènes de la vie, de la chaleur et de la lumière, pour qu'il soit inutile de chercher à connaître sa nature. Et d'ailleurs, qui sait s'il n'y a pas une relation intime entre certains phénomènes solaires et quelques phénomènes terrestres qu'il serait si important pour nous de prévoir avec quelque certitude?

Mais ce serait sortir de notre sujet que de l'envisager ainsi; les merveilles de la création ne doivent pas être exclusivement étudiées au misérable point de vue de l'utilité du moment. Nous savons par expérience que ce qui paraît n'être aujourd'hui qu'une spéculation oiseuse peut devenir demain une source de richesse; après tout, l'homme ne vit pas seulement de pain, il doit encore, pour entretenir la vie de son âme, s'assimiler les vérités abstraites ou sensibles dont l'ensemble constitue pour notre intelligence la parole du Créateur.

Nous allons donc aborder cet important sujet auquel nous avons, pendant plusieurs années, consacré tous nos soins et toutes nos recherches. Nous ne nous bornerons pas à exposer nos propres travaux; nous prendrons le vrai et le beau partout où nous le trouverons. Mais nous n'énoncerons aucune opinion sans avoir vérifié par nous-même les faits sur lesquels elle repose; nous n'exposerons aucune théorie sans l'avoir constatée autant que le comporte la nature même du sujet.

Cet Ouvrage, que nous publions aujourd'hui pour la première fois, était composé en italien depuis plusieurs années; nous en avons donné un spécimen dans une conférence faite en 1867 aux élèves de l'École Sainte-Geneviève et reproduite par les *Études religieuses*. A la sollicitation de plusieurs de nos amis, nous l'avons écrit en français, en l'abrégeant un peu. Le R. P. Larcher, professeur de Physique et préfet des études à l'École Sainte-Geneviève, a bien voulu retoucher notre manuscrit, afin que le style ne laissât rien à désirer sous le rapport de la correction et de l'élégance; il a traduit notre pensée avec la plus grande exactitude, en conservant presque toujours les expressions que nous avions nous-même employées; nous ne saurions trop le remercier de la patience et du dévouement dont il a fait preuve dans ce long et pénible travail. Quoique cette précaution

ne fût pas nécessaire, nous avons revu toutes les épreuves, afin d'éviter les erreurs qui se glissent si facilement dans les Ouvrages ainsi composés. L'éditeur et le graveur n'ont rien négligé pour assurer la perfection typographique et artistique; aussi avons-nous lieu d'espérer que les lecteurs seront satisfaits. En publiant cet Ouvrage en français, l'auteur est heureux de pouvoir payer à la France une faible partie du tribut de reconnaissance qu'il lui doit pour l'accueil plein de sympathie qu'il a reçu pendant l'Exposition universelle.

Puisse ce travail être utile au lecteur, en l'instruisant et en l'invitant à rendre hommage à Celui qui a placé sa tente dans le Soleil : *in Sole posuit tabernaculum suum Altissimus*.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

STRUCTURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER. — Aspect général du Soleil; ses taches et leurs lois principales.

CHAPITRE II. — Nouvelles méthodes d'observation.

CHAPITRE III. — Structure générale des taches solaires.

CHAPITRE IV. — Mouvements propres des taches. — Rotation du Soleil.

CHAPITRE V. — De l'atmosphère solaire.

CHAPITRE VI. — Phénomènes observés pendant les éclipses; conséquences qu'on en peut tirer relativement a l'atmosphère du Soleil.

CHAPITRE VII. — Des protubérances ou proéminences roses qu'on observe pendant les éclipses totales du Soleil.

CHAPITRE VIII. — Analyse spectrale de la lumière solaire.

CHAPITRE IX. — Température solaire; son origine; sa conservation.

DEUXIÈME PARTIE.

ACTIVITÉ EXTÉRIEURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER. — Les radiations.

CHAPITRE II. — Le Soleil centre de force. — Gravitation.

TROISIÈME PARTIE.

LES SOLEILS OU LES ÉTOILES

CHAPITRE UNIQUE.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

LE SOLEIL.

PREMIÈRE PARTIE.

STRUCTURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER.

ASPECT GÉNÉRAL DU SOLEIL; SES TACHES ET LEURS LOIS PRINCIPALES.

§ I. — *Aspect général du Soleil.*

Le Soleil se présente à nos yeux comme un disque rond sous-tendant un angle de 32 minutes, c'est-à-dire un peu plus d'un demi-degré. Si nous tenons compte de la distance, ce diamètre apparent suppose des dimensions énormes, dont il est difficile de nous faire une idée exacte. La distance moyenne qui sépare le Soleil de la Terre est égale à 23150 rayons terrestres, c'est-à-dire 148 millions de kilomètres. Le diamètre réel du Soleil est 108 fois le diamètre de notre planète, de sorte que son rayon est presque le double de la distance de la Lune à la Terre. Ainsi, son volume est presque égal à celui de huit sphères ayant un rayon égal à la distance qui nous sépare de la Lune. Il est 1259712 fois plus gros que la Terre;

un arc d'une seconde, vu de la Terre au centre du disque solaire, est équivalent à 715 kilomètres; la Terre entière, vue sur le Soleil, ne sous-tendrait qu'un angle de 17",82; son rayon sous-tendrait donc 8",91: c'est la valeur de la parallaxe équatoriale du Soleil actuellement adoptée, et sur laquelle reposent tous nos calculs. Ces nombres nous serviront bientôt pour apprécier les dimensions des objets que nous voyons sur le disque solaire et pour en évaluer les mouvements.

Les anciens ne connaissaient aucune des particularités relatives à la constitution physique de cet astre. On avait bien signalé de temps en temps quelques taches noires que l'on pouvait distinguer à l'œil nu lorsqu'il était près de l'horizon; mais on les prenait pour des planètes en conjonction ou pour des phénomènes dont la cause était inconnue. Telles sont les taches qui furent observées, l'une au temps de Charlemagne, l'autre en 1588. Fabricius observait le Soleil en introduisant un rayon lumineux par une ouverture étroite dans une salle complétement obscure; c'est ainsi qu'au mois de décembre 1610, il réussit à voir une tache considérable et à étudier son mouvement d'une manière assez précise pour pouvoir en conclure le mouvement de rotation du Soleil. Mais cette observation ne fut publiée que plus tard, alors que d'autres observateurs, armés de lunette, avaient obtenu de meilleurs résultats.

Les taches solaires se présentent ordinairement comme des points noirs de forme ronde; bien souvent, cependant, elles sont groupées de manière à former par leur ensemble des figures irrégulières. La partie

centrale est noire; on l'appelle le *noyau* ou l'*ombre :* le contour est formé par une demi-teinte qu'on appelle la *pénombre*. Les contours de l'ombre et ceux de la pénombre sont nettement tranchés, au moins dans la plupart des cas.

Les dimensions des taches sont extrêmement variables. Quelques-unes se présentent comme de simples points noirs, qu'on appelle des *pores ;* on en voit fréquemment qui sous-tendent des angles de 30 à 40 secondes. Les grandes taches sont rares, et résultent ordinairement de plusieurs taches juxtaposées. On a vu des groupes semblables atteignant plusieurs minutes de diamètre; leur surface était donc plus grande que celle de la Terre, plus grande même que celle de la planète Jupiter. La *fig.* 1 représente l'aspect que

Fig. 1.



présentait le Soleil quelques instants avant l'éclipse

du 18 juillet 1860; elle peut donner une idée du nombre et de la grandeur relative des taches.

Sur les bords du disque, on voit de petites taches blanches que les astronomes appellent *facules;* nous les étudierons bientôt. Toutes ces taches changent de place et de forme, d'après des lois que nous apprendrons à connaître. Enfin les bords de l'image sont toujours beaucoup moins lumineux que le centre; on le reconnaît facilement en employant un fort grossissement, et en promenant alternativement le centre de la projection au bord et au centre du disque solaire (*fig.* 1).

§ II. — *Découverte des taches solaires. — Moyens de les observer.*

La découverte des taches est une de celles dont on peut dire qu'elles sont faites par une époque et non par un homme. Plusieurs savants ayant à leur disposition des lunettes, ils devaient tôt ou tard les diriger vers le Soleil. La seule difficulté consistait à protéger les yeux de l'observateur. Ainsi Galilée montrait les taches aux littérateurs de Rome, dans le jardin Bandini, mais seulement lorsque le Soleil était auprès de l'horizon; à la même époque (mars 1611), Scheiner les observait à Ingolstadt, à l'aide d'un verre bleu placé en avant de l'oculaire. Cette découverte a donc été faite simultanément par plusieurs savants; nous savons que Fabricius les avait tous devancés.

Galilée paraît avoir précédé Scheiner dans l'observation des taches; mais il ne les étudia pas d'une manière suivie, et il n'en comprit l'importance qu'après

la publication des trois lettres pseudonymes adressées par le jésuite allemand à Marc Velser, bourgmestre d'Augsbourg, sous la date du 12 décembre 1611. Scheiner parlait dans ces lettres du nombre des taches, de la variation de leurs formes, et de leur mouvement apparent sur le disque solaire; il parle également des pénombres, des facules et des moyens d'observation. Mais il propose une explication malheureuse en attribuant ce phénomène à des planètes très-voisines du Soleil.

Ces lettres excitèrent vivement l'attention de Galilée; il reconnut aussitôt l'intérêt, mais aussi les difficultés de ce sujet. Il se mit donc à l'œuvre, et, après quelques mois d'observations, il fut en état de donner la véritable théorie. Il reconnut que les taches sont adhérentes au corps solaire, et que leur translation apparente est due au mouvement de rotation de cet astre lui-même. Il était alors très-difficile d'arriver à cette conclusion, car la lunette de Galilée, la seule connue à cette époque, ne permet pas l'emploi du micromètre; on ne pouvait donc prendre les positions que d'une manière fort inexacte, et les mesures ne devinrent précises qu'à l'époque où l'on commença à étudier les images projetées sur un écran à l'aide de la lunette.

Malheureusement, l'histoire de cette belle découverte serait incomplète, si nous ne disions pas un mot de la polémique qu'elle souleva relativement à la question de priorité. Nous l'avons dit, la découverte elle-même devait nécessairement se faire, ce n'était qu'une question de temps et de hasard. Mais ensuite, il appartenait au génie de découvrir la théorie véri-

table, à la patience attentive et persévérante d'étudier les phénomènes. Sous le rapport du génie, Galilée est sans rival; mais sous le rapport des observations, Scheiner a bien mérité de la science. Plus tard, dans l'ardeur de la controverse, on l'a accusé de plagiat; mais le témoignage de Galilée suffit abondamment pour répondre à cette accusation. On doit à la persévérance toute germanique de Scheiner une longue suite d'observations pleines de détails intéressants, et qui ont été dans ces derniers temps appréciées à leur juste valeur. Il employa le premier les verres colorés et le système de projection par la lunette. Il perfectionna ce procédé d'après les conseils du P. Grienberger et contruisit ainsi un appareil qui est la première forme de l'équatorial moderne.

L'observation des taches par voie de projection est assez commode et assez exacte pour que nous en donnions la description. Au volet d'une chambre obscure on fait une ouverture de la grandeur de l'objectif; on place la lunette dans la direction des rayons solaires, et on déplace l'oculaire jusqu'à ce que l'image soit bien terminée à ses bords; les taches, s'il y en a, ne tarderont pas à apparaître bien nettes et bien définies.

Les observatoires emploient maintenant pour ces projections de grands instruments qui servent également à photographier le Soleil. La *fig.* 2 représente l'appareil employé au Collége Romain, où chaque jour on observe les taches, lorsque le temps le permet. M. Carrington a employé un procédé semblable à l'observatoire de Redhill. Voici la description de la machine :

AB, lunette portant, par le moyen de la barre LK, la planchette QO, sur laquelle doit se faire la projec-

Fig. 2.

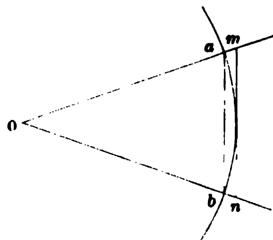


tion. EF, axe polaire incliné sous l'angle de la latitude, portant deux branches CD, sur lesquelles repose l'axe de la lunette. GHI, support de fonte sur lequel

repose tout l'appareil, et fixé sur un pilier en maçonnerie. M et N sont les cercles de déclinaison et d'ascension droite. RS est une tige de fer puissante qui sert à fixer la lunette.

Lorsque les projections se font sur une grande échelle, il faut faire subir aux mesures une correction qui peut devenir importante. L'image solaire se forme réellement sur une surface sphérique *ab* (*fig.* 3), ayant

Fig. 3.



son centre en O, tandis que le dessin se produit sur un plan tangent *mn*, ou plutôt sur le plan *ab*, si l'on met au point le bord du Soleil. La différence entre la corde *ab* et la tangente *mn* n'est pas négligeable, et cette cause d'erreur n'avait pas échappé à Scheiner (1). Du reste, cette méthode ne peut servir que pour des recherches générales; lorsqu'on veut obtenir les détails avec précision, il faut employer les mesures micrométriques.

(1) *Voir* la *Rosa ursina* et les ouvrages de Galilée. La *Rosa ursina* contient bien des choses inutiles. Mais que ne pardonne-t-on pas à Képler? C'était la faute de l'époque et du pays.

§ III. — *Lois fondamentales du mouvement des taches.*

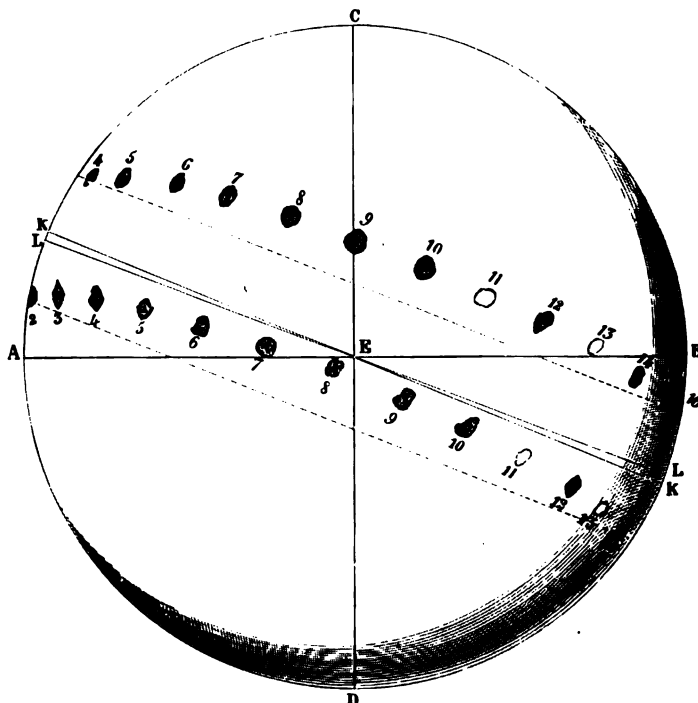
1° En général, les taches se présentent sur le bord oriental du Soleil, traversent le disque en suivant des lignes obliques par rapport au mouvement diurne et au plan de l'écliptique, et après quatorze jours environ, elles disparaissent au bord occidental. Il n'est pas rare de voir une même tache, après être restée invisible pendant une période de quatorze jours, apparaître de nouveau au bord oriental pour faire une seconde, quelquefois une troisième et même une quatrième révolution; mais plus généralement elles se déforment et finissent par se dissoudre avant de sortir du disque, ou pendant qu'elles sont du côté opposé.

2° Lorsque sur le disque solaire paraissent simultanément plusieurs taches, elles décrivent, dans le même temps, des trajectoires semblables et sensiblement parallèles. Il faut en conclure qu'elles ne sont pas indépendantes, comme seraient des satellites, mais qu'elles se trouvent sur la surface du Soleil, et qu'elles sont entraînées dans son mouvement de rotation. De plus, si les taches étaient des astres indépendants, il faudrait en dire autant des facules, qui sont assujetties au même mouvement de translation; hypothèse absurde, car, comme le disait si bien Galilée, on ne peut pas supposer qu'il existe autour du Soleil des astres plus brillants que le Soleil lui-même.

3° Si l'on note chaque jour sur le même dessin la position des taches, on voit que leur mouvement apparent est plus rapide auprès du centre, tandis qu'il devient très-lent au bord du disque solaire. Nous

donnons dans la *fig.* 4 les trajectoires de deux taches observées par Scheiner, du 2 au 14 mars 1627. Les

Fig. 4.

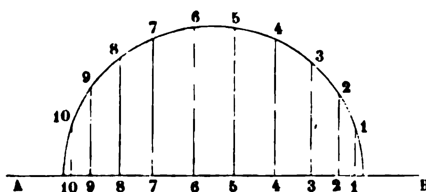


endroits ponctués indiquent des lacunes dues à la présence des nuages. Les taches sont nettement terminées, les ombres et les pénombres parfaitement tranchées. On peut juger de la courbure des trajectoires par leurs cordes. On voit facilement qu'elles n'ont pas toujours décrit le même espace dans des temps égaux.

Mais ces différences ne sont qu'apparentes, et elles

résultent de ce que le mouvement nous paraît avoir lieu sur un plan, tandis qu'en réalité il a lieu sur un cercle parallèle à l'équateur solaire; nous projetons ce parallèle, et avec lui les positions successivement occupées par les taches, sur un plan perpendiculaire au rayon visuel. Pour représenter le phénomène, traçons une demi-circonférence, divisons-la en un certain nombre de parties égales, et de chacune de ces divisions, abaissons des perpendiculaires sur le diamètre AB (*fig.* 5); nous partagerons ainsi le dia-

Fig. 5.

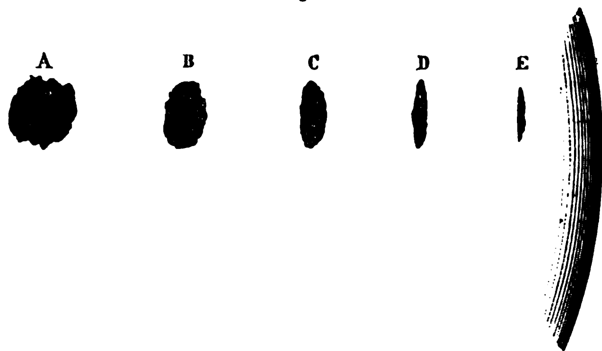


mètre en un certain nombre de parties inégales, mais qui sont cependant les projections d'arcs égaux entre eux, et ces projections sont d'autant plus petites que les arcs correspondants se rapprochent davantage de l'extrémité du diamètre. En employant une construction semblable, Galilée montra que les taches ne peuvent être des corps détachés du Soleil et éloignés de sa surface, car le rayon du parallèle solaire satisfaisait seul au calcul des translations diurnes.

4° Les taches, en s'approchant du bord, perdent leur forme arrondie, deviennent ovales, puis se rétrécissent au point de devenir presque linéaires; on peut en juger par les quatre figures amplifiées que nous reproduisons ici (*fig.* 6).

Ces changements sont encore de simples apparences dues à un effet de perspective; on les explique de la

Fig. 6.



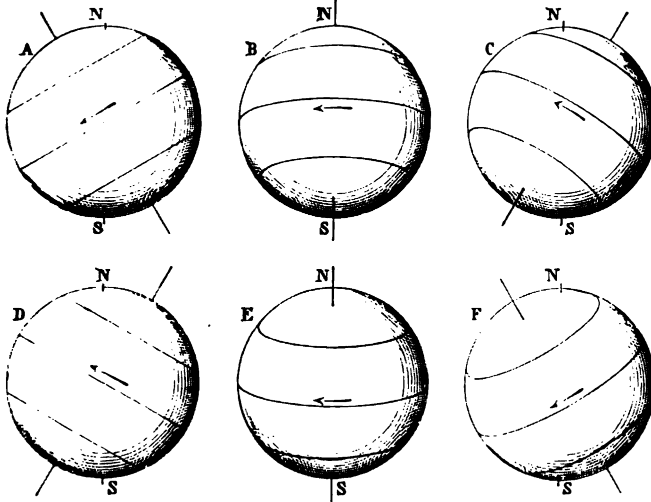
même manière que le ralentissement apparent. Mais ce phénomène prouve encore que les taches sont adhérentes à la surface du Soleil; car, dans l'hypothèse contraire, il faudrait les attribuer à des corps très-aplatis, ce qui serait contraire à tout ce que nous connaissons de la forme propre aux corps célestes. Galilée les compara à des nuages; plus tard Scheiner les regarda comme des cavités. Nous verrons bientôt à quoi il faut s'en tenir.

5° Outre ces déformations apparentes, il y en a de réelles. La forme des taches change quelquefois d'une manière très-notable, non-seulement d'un jour à l'autre, mais dans l'espace de quelques heures. Quelquefois plusieurs taches se confondent en une seule; quelquefois une tache se divise en plusieurs autres; nous en verrons bientôt des exemples frappants. Ces changements de forme influent beaucoup sur le mouvement; la régularité géométrique indiquée ci-dessus

en est profondément troublée, et c'est ce qui empêcha les premiers observateurs de déterminer avec précision la durée de la rotation solaire.

6° Les trajectoires décrites par les taches varient avec la saison : au mois de mars, ce sont des ellipses très-allongées tournant leur convexité vers le nord, le grand axe de l'ellipse étant presque parallèle à l'écliptique (*fig.* 7, B.). Après cette époque, la cour-

Fig. 7.



bure des ellipses diminue graduellement, en même temps qu'elles s'inclinent sur l'écliptique comme en (*fig.* 7, C), en sorte qu'au mois de juin elles se trouvent transformées en lignes droites telles que (*fig.* 7, D). De juin à septembre, les courbes elliptiques reparaissent, mais leur position est inverse de la précédente (*fig.* 7, E). Puis, en suivant des phases inverses, elles repassent par la courbe allongée (*fig.* 7, F), et prennent

la ligne droite (*fig.* 7, A), pour revenir enfin, au bout d'un an, à la forme B. Le point N est le pôle nord de l'écliptique. Dans cette figure, les courbures ont été un peu exagérées, de manière à mieux faire comprendre leurs variations.

Toutes ces formes des trajectoires apparentes sont simplement des effets de perspective. En réalité, les taches décrivent des parallèles à l'équateur solaire; ce sont ces parallèles que nous projetons à chaque instant sur un plan perpendiculaire à la droite qui passe par le lieu de l'observation et le centre du globe solaire. Ces projections doivent nécessairement changer de forme à mesure que l'observateur se déplace; elles nous apparaissent sous des aspects différents, suivant la position que la Terre occupe par rapport à l'équateur solaire. Lorsqu'elle est à l'un de ses nœuds, c'est-à-dire à l'un des points où l'écliptique rencontre l'équateur solaire, tous les parallèles se projettent suivant des lignes droites, et les trajectoires apparentes des taches sont rectilignes. C'est ce qui arrive lorsque la longitude du Soleil est de 74° 30′ et 254° 30′, c'est-à-dire le 4 juin et le 6 décembre. Lorsqu'au contraire la Terre se trouve au-dessus ou au-dessous de l'équateur solaire, les trajectoires se projettent suivant des ellipses, et ces courbes sont d'autant plus prononcées, que nous sommes plus éloignés de ce plan. Le maximum de courbure aura lieu pour des longitudes différant de 90 degrés de celles que nous venons d'indiquer pour les nœuds.

7° Les taches ne se montrent pas indifféremment sur tous les points du disque. Elles sont peu nombreuses dans le voisinage immédiat de l'équateur, et

très-rares dans les latitudes supérieures à 35 ou 40 degrés. Elles se montrent en plus grande quantité dans deux zones symétriques qu'on a appelées *zones royales* comprises entre 10 et 30 degrés de latitude héliocentrique.

8° Le nombre des taches est très-variable. Quelquefois elles sont assez nombreuses pour qu'on puisse, par une seule observation, reconnaître les zones qui les contiennent habituellement. Quelquefois au contraire elles sont si rares, qu'une année entière peut s'écouler sans qu'on en voie une seule. On a reconnu une remarquable régularité dans la manière dont se succèdent ces périodes.

9° Lorsqu'on cherche à déterminer la durée de la rotation solaire par le retour des taches, on trouve de grandes anomalies, dont l'explication est restée longtemps inconnue. On trouve en moyenne qu'une tache revient (du moins en apparence) à sa position primitive au bout de vingt-sept jours environ. Mais il y a dans cette évaluation une cause de variation, dont il faut tenir compte. Pendant ce temps, la Terre n'est pas restée immobile; elle a décrit sur son orbite un arc d'environ 25 degrés, dans le sens même de la rotation solaire. Au moment où une tache achève sa rotation apparente, elle a donc décrit un cercle complet, et, depuis deux jours à peu près, elle a commencé une seconde révolution. En effectuant la correction exigée par cette circonstance, on trouvera pour durée véritable de la rotation solaire vingt-cinq jours et demi environ.

Mais ce n'est encore là qu'une approximation regardée comme insuffisante par les savants. Le contour

apparent du Soleil ne coupe pas toujours en deux parties égales le cercle que décrit une tache; de là une nouvelle irrégularité dans le mouvement apparent. De la combinaison de ces mouvements il résulte qu'au lieu de décrire une ellipse simple, un point de la surface du Soleil, observé de la Terre, décrit une ellipse dont les axes varient constamment de grandeur et de position. De là l'origine d'un problème compliqué dont les géomètres ont donné plusieurs solutions utiles et intéressantes.

§ IV. — *Hypothèses émises sur la nature des taches.*

Scheiner avait d'abord regardé les taches comme des satellites tournant autour du Soleil : opinion insoutenable, bientôt abandonnée par son auteur, et qu'on a cependant essayé de faire revivre. Après avoir longtemps gardé un silence prudent, Galilée les attribua à des nuages flottant dans l'atmosphère solaire : c'était la meilleure conclusion qu'on pût tirer des observations peu précises qu'on avait pu faire. Cette opinion eut longtemps l'approbation générale; elle a même été reprise de nos jours par des savants très-respectables. Nous ne croyons cependant pas qu'on puisse la soutenir, et dès les premiers temps on lui faisait des objections très-sérieuses. Dans les dernières années de sa vie, Scheiner annonça que les taches étaient situées au-dessous du niveau général de la surface solaire, mais sans faire connaître avec des détails suffisants les faits sur lesquels reposait cette opinion.

Quelques astronomes crurent au contraire que c'étaient des montagnes dont les flancs plus ou moins escarpés auraient produit le phénomène de la pénombre : opinion inconciliable avec le mouvement propre que les taches possèdent quelquefois d'une manière bien prononcée. Enfin, on les regarda aussi comme des amas de scories flottant à la surface de l'océan de feu qui constituait le Soleil.

Cependant un siècle s'était à peine écoulé, qu'un astronome anglais, Wilson, faisait une découverte mémorable; il montrait avec évidence que les taches sont dues à des cavités, et il donnait le premier une idée exacte de la manière dont est composée la photosphère (1). Nous développerons plus tard ses observations; qu'ils nous suffise de rappeler en ce moment qu'elles ont été le point de départ des grands travaux d'Herschel, dont il nous reste à parler. Nous n'en dirons que quelques mots, car l'époque de cet astronome touche de très-près à celle où il devient impossible de suivre l'ordre chronologique dans l'exposé des découvertes.

§ V. — *Travaux d'Herschel.*

W. Herschel était un homme de génie, mais il était par-dessus tout un observateur hors ligne. Il a vu tant de phénomènes à l'aide des puissants instruments qu'il avait construits de ses propres mains, il a si minutieusement décrit les merveilles qui lui étaient ainsi révélées, qu'il a laissé fort peu de chose à faire à ses succes-

(1) On appelle ainsi la couche lumineuse qui enveloppe le Soleil.

seurs. Seulement, ses instruments lui étant pour ainsi dire personnels, il en fut de même du langage qu'il dut créer pour s'exprimer; ce langage ne fut pas toujours compris, et c'est maintenant seulement, qu'à l'aide d'instruments comparables aux siens, nous pouvons juger de l'étendue de ses découvertes.

L'idée capitale d'Herschel reposait sur la découverte de Wilson. Il remarqua avec raison, comme l'avait fait cet astronome, que si les taches sont des cavités, la matière lumineuse ne saurait être, à proprement parler, ni liquide ni gazeuse; car alors elle se précipiterait avec une effrayante rapidité pour remplir le vide, ce qui rendrait impossible la persistance des taches que nous voyons quelquefois durer pendant plusieurs révolutions. D'ailleurs, les mouvements propres des taches prouvent que la photosphère n'est pas solide; on ne peut donc plus la comparer qu'aux brouillards et aux nuages, et elle doit être suspendue dans une atmosphère semblable à la nôtre; telle est la seule hypothèse qui puisse expliquer les rapides variations dont nous sommes les témoins.

Dans son second Mémoire, Herschel poursuit cette étude avec une perspicacité digne de son génie. Malheureusement il se laisse séduire par l'idée de l'*habitabilité* du Soleil. Il lui fallut donc un noyau solide sur lequel pussent reposer ses habitants, et une circonstance quelconque qui les protégeât contre les radiations de la photosphère. Pour cela, il suppose, au-dessus du noyau, une couche de nuages toujours contiguë à la photosphère qui l'enveloppe, et se déchirant en même temps qu'elle pour laisser apercevoir le noyau : hypothèses arbitraires, n'ayant aucun

fondement dans l'observation, et conduisant à des explications qui sont en complet désaccord avec les principes de la physique moderne.

Cependant les travaux d'Herschel contiennent tant de choses positives, tant d'idées justes, qu'ils ont fait faire de très-grands progrès à nos connaissances sur la véritable constitution du Soleil, et nous le prendrons souvent pour guide dans l'exposé que nous aurons à faire.

Nous n'avons rien dit des travaux des anciens astronomes, Hévélius, Cassini, Huyghens, etc. Leurs observations, quelque laborieuses qu'elles aient été, ont rendu peu de services à la science. Il n'en est pas de même de l'époque moderne. Nous aurons souvent à citer Sir John Herschel, M. Carrington, M. Warren de la Rue, M. Faye, M. Spoerer, M. Wolf, M. Schwabeen. Contentons-nous de citer ces noms que nous retrouverons souvent dans le courant de ce travail.



CHAPITRE II.

NOUVELLES MÉTHODES D'OBSERVATION.

§ I. — *Oculaires hélioscopiques.*

La grande intensité de la lumière du Soleil a toujours été la principale difficulté à vaincre dans l'observation des phénomènes qui se passent à la surface de cet astre. L'emploi des verres fortement colorés est un moyen précieux pour les lunettes ordinaires; mais, dans les grands instruments, ils se brisent ou se fondent avec la plus grande facilité. Pour remédier à cet inconvénient, on a longtemps employé des diaphragmes destinés à réduire l'ouverture de l'objectif; mais on perdait ainsi une partie des avantages que présentaient les grands instruments, et en même temps on diminuait beaucoup la netteté de l'image. Ce dernier résultat tient à un phénomène de diffraction, qui est d'autant plus sensible que l'ouverture du diaphragme est plus étroite; chaque point se trouve représenté par un cercle d'une certaine étendue, et, tous ces cercles empiétant les uns sur les autres, il en résulte une image plate et confuse, dans laquelle il devient impossible de distinguer les détails.

Herschel avait éprouvé ces inconvénients, aussi aimait-il mieux employer des verres fortement colorés, en conservant toute l'ouverture de son télescope. Il essaya plusieurs autres moyens, et en particulier des

liquides diversement colorés, par exemple de l'eau mélangée d'encre; mais la chaleur produisait dans ces liquides des mouvements tumultueux, et il en résultait une grande confusion dans les images. Son fils John proposa d'employer un miroir concave fait en verre non étamé; on obtiendrait ainsi, vu le faible pouvoir réflecteur du verre, une image encore trop vive pour être examinée à l'œil nu, assez faible cependant pour qu'on pût l'observer avec un verre coloré, malgré l'ouverture considérable de l'appareil. M. Chacornac a récemment employé ce procédé, avec un télescope Foucault non argenté. Foucault, au contraire, a proposé d'argenter la surface antérieure des objectifs de lunettes, et de regarder le Soleil à travers cette mince couche de métal. On assure que les images sont très-belles et très-agréables à l'œil. Mais ces différents procédés exigent un instrument spécialement destiné au Soleil, et peu d'astronomes se décideront sans doute à sacrifier ainsi leur meilleur objectif.

Il était donc important de trouver un moyen qu'on pût adapter facilement à tous les instruments. L'astronome anglais Dawes proposa de mettre le diaphragme, non à l'objectif, mais à l'oculaire; pour cela, il recevait l'image sur une plaque d'ivoire doublée de métal, et regardait par un trou très-petit J'ai souvent employé à cet usage une simple carte de visite recouverte de céruse, et percée d'un trou d'épingle; loin de brûler, elle ne se noircit même pas malgré la grande quantité de chaleur qui se concentre au foyer d'un large objectif. Le seul inconvénient, c'est que le champ de vision devient très-étroit. Cet inconvénient n'est pourtant pas sans quelques compensa-

tions, car la plus grande partie du disque étant cachée, l'œil est bien plus à son aise pour étudier les détails.

Cependant, même avec de petits diaphragmes, il faut toujours employer un verre coloré. Les meilleurs sont ceux qu'on appelle des verres *gradués*, formés de deux pièces taillées en forme de coin; l'une est blanche, l'autre bleue; on les superpose simplement, car toutes les substances qui pourraient servir à les coller se gonflent par la chaleur et forment des bulles. En mettant ce verre gradué (*fig* 8) dans une monture qui glisse devant l'oculaire, on peut régler à volonté

Fig. 8.

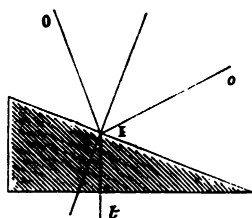


l'intensité de la lumière, ce qui présente de grands avantages.

Mais le meilleur moyen a été proposé par Sir John Herschel. Il consiste à employer la lumière réfléchie. On a essayé de produire cette réflexion à la surface d'une lame de verre très-fortement colorée; on évitait ainsi la réflexion sur la seconde face, et par conséquent on écartait une cause de trouble dans la formation de l'image. Mais alors les rayons qui ne sont pas réfléchis sont absorbés; le verre s'échauffe, se déforme et finit par se briser. Herschel a évité tous ces inconvénients en adoptant la disposition suivante : un prisme rectangulaire de cristal est disposé de manière que le rayon incident OI (*fig*.9) vienne se réfléchir sur son hypoténuse; les rayons qui pénètrent dans le cristal sortent perpendiculairement à la seconde face, suivant la direction I*t*, et l'on évite ainsi les réflexions inté-

rieures qui seraient gênantes. Le prisme est fixé dans

Fig. 9.



une monture à claire-voie (*fig.* 10), afin d'éviter l'élé-

Fig. 10.

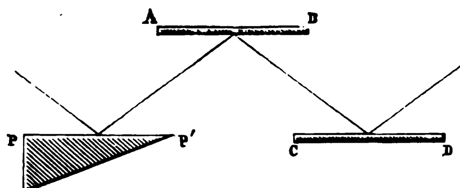


vation de température. Par cette disposition, l'appareil s'échauffe très-peu et la lumière est tellement affaiblie, qu'on peut se contenter d'un verre coloré très-mince.

Cependant, le verre coloré subsiste toujours, et empêche de voir le Soleil avec sa teinte véritable. Cet inconvénient disparaît dans l'oculaire polariseur imaginé par le P. Cavalleri de Monza. Nous nous servons d'un de ces hélioscopes, construit à Milan par MM. Porro et Dell'Aqua. La lumière est d'abord reçue sur un prisme PP' semblable à celui d'Herschel (*fig.* 11), seulement l'incidence a lieu sous l'angle de 36 degrés, sous lequel le verre polarise la lumière. De là les rayons viennent tomber sur un miroir de verre noir AB, parallèle au prisme; cette incidence a donc

encore lieu sous l'angle de 36 degrés. Enfin la lumière vient subir une dernière réflexion en CD, toujours

Fig. 11.



suivant l'angle de polarisation. Le prisme et le premier miroir sont fixés dans une position invariable l'un par rapport à l'autre; mais le miroir CD est monté dans un tube qui tourne librement, en sorte qu'on peut le mettre dans tous les azimuts possibles par rapport au rayon réfléchi. En disposant CD perpendiculairement au plan de polarisation, on affaiblit la lumière au point que l'œil peut la supporter sans inconvénient, même à l'époque où le Soleil est à sa plus grande hauteur. La lumière n'y disparaît pas complétement, mais ce serait inutile.

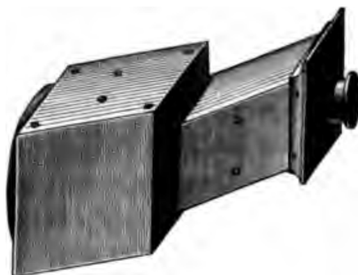
La *fig.* 12 représente cet oculaire réduit à un quart de sa grandeur naturelle.

Fig. 12.



M. Merz nous a envoyé un oculaire construit d'après les mêmes principes (*fig.* 13), dans lequel l'extinction

Fig. 13.



de la lumière est complète, grâce à un quatrième réflecteur. Les surfaces sont parfaitement planes, mais le prisme est remplacé par un verre coloré, ce qui fait craindre que la chaleur ne le brise. Cette disposition a d'ailleurs un grand avantage, c'est que le rayon sort parallèlement à l'axe de la lunette, ce qui est impossible dans l'autre système.

Ces hélioscopes sont très-coûteux, mais ils présentent bien des avantages, et en particulier celui de modérer à son gré l'intensité de la lumière. Cependant, malgré toutes les précautions qu'on prend pour garantir la vue des observateurs, et obtenir de bonnes images, il subsiste un inconvénient qu'on ne saurait éviter, c'est l'échauffement des objectifs et celui de la masse d'air contenue dans les tubes. Il en résulte des irrégularités très-sensibles dans les réfractions; aussi au bout de quelques minutes les images ne présentent plus la même netteté, et l'on est obligé d'interrompre l'observation pendant quelque temps pour que la température puisse s'abaisser. M. Nashmyth a proposé

d'employer des lunettes sans tubes, comme celles d'Huyghens. Ce procédé pourrait réussir pour les grands reflecteurs; pour les réfracteurs, on pourrait adopter des tubes à claire-voie; l'air circulant librement s'échaufferait beaucoup moins.

Nous recommandons aux observateurs d'éviter les verres rouges et les noirs; ils laissent passer beaucoup de chaleur, et leur couleur est fatigante pour l'organe de la vue. Les teintes vertes, jaunes ou neutres sont les meilleures.

§ II. — *Photographies solaires. — Dessins.*

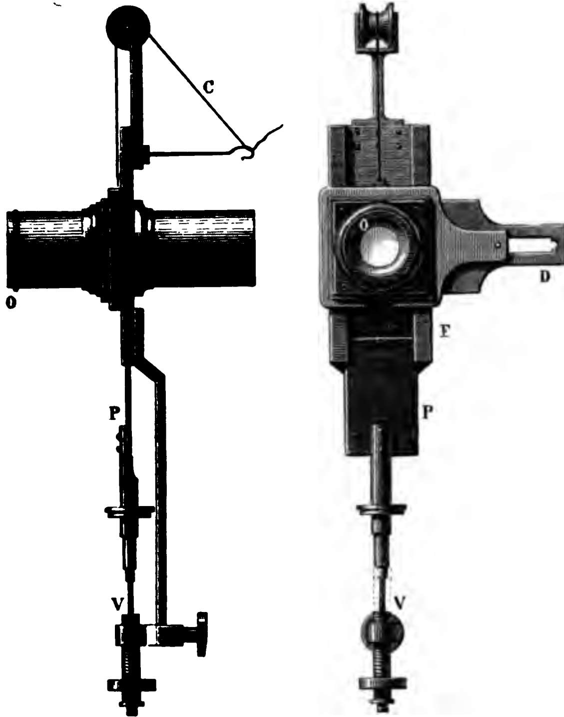
La photographie a rendu de très-grands services, soit dans les observations ordinaires du Soleil, soit dans les éclipses. On obtient les épreuves photographiques avec le même appareil qui sert pour les projections; seulement on met au foyer deux fils croisés qui serviront à l'orientation de l'image.

La durée de l'exposition doit être tellement courte, qu'il faut pour la régler employer un appareil spécial. Il consiste en une plaque métallique glissant dans une rainure, et portant une fente très-étroite, dont on peut faire varier la largeur à volonté. Au moment de l'opération, on lâche une détente; la plaque obéit à l'action d'un ressort, et la fente passe rapidement à travers le cône lumineux.

La *fig.* 14 représente l'oculaire que nous adaptons à notre équatorial, pour ces opérations. Il est semblable à celui de Kiew, et nous l'avons fait construire par Dallmayer à Londres. La lunette doit être portée par un mouvement d'horlogerie, quoiqu'à la rigueur

on puisse la mouvoir à la main; de plus, elle doit avoir un chercheur assez puissant pour s'assurer qu'au

Fig. 14.



moment de l'opération la plaque est dans une position convenable.

O est l'oculaire positif, composé de lentilles achromatiques, destiné à former l'image; P est la plaque glissant verticalement, munie d'une fente F, et d'un diaphragme circulaire dans la partie supérieure. D est une plaque glissant horizontalement, et percée de deux trous, l'un complétement libre, l'autre portant

deux fils micrométriques croisés à angle droit. V est un ressort en caoutchouc ou en spirale d'acier pour produire le mouvement de la plaque verticale; C un cordon destiné à la retenir jusqu'au moment de l'opération.

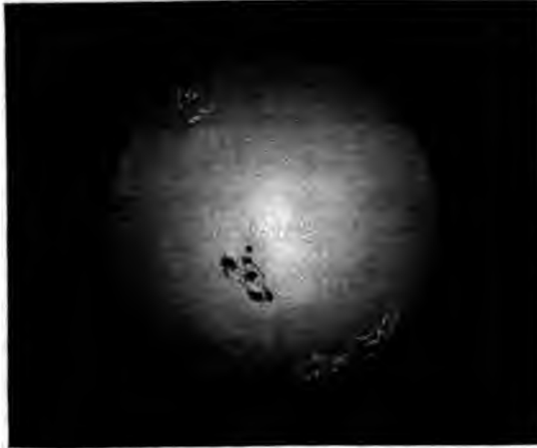
L'opération se fait de la manière suivante : la plaque P étant disposée de manière à ce que les rayons lumineux puissent parvenir au verre dépoli, on met au point comme à l'ordinaire; puis on soulève la plaque jusqu'à ce que la fente F soit tout entière au-dessus du cône lumineux, et on la retient dans cette position à l'aide du fil C. Lorsque la glace sensibilisée a été mise à la place du verre dépoli, on coupe le fil; la fente F passe rapidement dans le cône lumineux, et l'impression est produite. On révèle ensuite l'image et on la fixe par les procédés ordinaires.

On évalue à un centième de seconde au plus le temps nécessaire pour obtenir une bonne épreuve; mais cela dépend de plusieurs circonstances. Si l'exposition a été trop prolongée, les taches disparaissent et les bords manquent de netteté. Le diamètre de l'image dépend lui-même de la durée de l'exposition; si le temps est trop court, les bords sont mal tracés, on reconnaît avec évidence la forme sphérique du Soleil, et l'on peut juger de la forte absorption qu'exerce son atmosphère. La *fig.* 15 a été obtenue dans de semblables circonstances par M. Selvyn, en octobre 1860.

L'oculaire et la plaque doivent être renfermés dans une boîte obscure sur le prolongement de la lunette, et faisant corps avec elle; ou bien, à l'aide d'une étoffe noire très-épaisse, on transforme le dôme

en une chambre noire, afin d'éviter l'action de la lumière diffuse. Il est rare que le foyer optique coïncide

Fig. 15.



exactement avec le foyer chimique; aussi faut-il le chercher par une série d'expériences préliminaires.

Les dessins des taches sont très-difficiles à faire, lorsqu'elles ont une forme compliquée; et cependant on ne saurait s'en dispenser, car c'est le seul moyen d'obtenir avec exactitude certains détails que la photographie reproduit difficilement. Ces détails sont tellement changeants, qu'il faut quelquefois les saisir, pour ainsi dire, au vol.

Il serait donc important d'avoir un moyen qui permît aux observateurs de fixer ces souvenirs, sans qu'ils fussent des artistes accomplis. La meilleure méthode que nous ayons trouvée consiste à peindre sur du papier noir avec du blanc de plomb; le blanc que nous employons, connu dans le commerce sous le nom de

paillard, est en pains très-petits, portant le titre de *blanc d'argent*. En employant des pinceaux assez fins, nous parvenons à reproduire les plus petits détails. Pour cela, nous commençons par prendre, avec la lunette, une projection très-agrandie de la tache; deux fils d'araignée, dont on a déterminé la distance angulaire, projettent en même temps leur image sur l'écran, ce qui sert de points de repère pour les mesures à effectuer; ensuite nous terminons cette esquisse. C'est par ce procédé que nous avons exécuté, avec les PP. Ferrari et Capelleti, la plupart des dessins que nous conservons à l'Observatoire.

Ces figures terminées, comme on les a faites à dessein sur une grande échelle, on les réduit par la photographie. C'est ainsi que nous avons fait les figures reproduites dans ce Livre, et surtout celles qui représentent les détails des pénombres. Les gravures elles-mêmes ont été faites d'après les réductions photographiques.

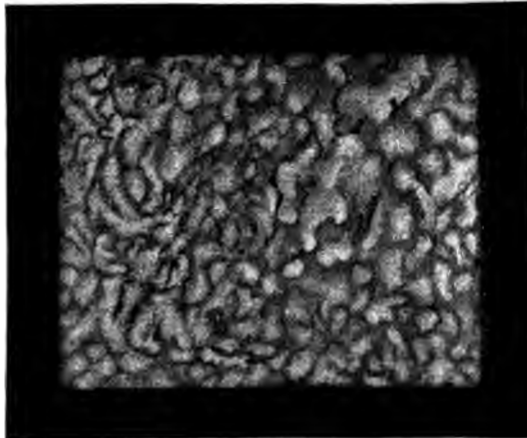
CHAPITRE III.

STRUCTURE GÉNÉRALE DES TACHES SOLAIRES.

§ I. — *Aspect général de la photosphère.*

Lorsqu'on examine le Soleil avec des instruments ayant une grande ouverture et un fort pouvoir grossissant, on voit que sa surface, loin d'être lisse et uniforme, présente une apparence irrégulière et ondulée, comme une mer agitée par la tempête. Lorsqu'on la projette sur un écran blanc, à l'aide d'un puissant oculaire, on lui trouve l'aspect représenté dans la *fig.* 16, caractérisé par une multitude de rides et d'anfractuosités impossibles à détailler.

Fig. 16.



Quelquefois, surtout auprès du bord, et dans le voisinage des taches, on aperçoit çà et là des masses plus lumineuses qu'on appelle des *facules*. Elles occupent souvent un espace assez considérable; il est rare qu'elles soient très-vives et isolées. La *fig.* 17 re-

Fig. 17.

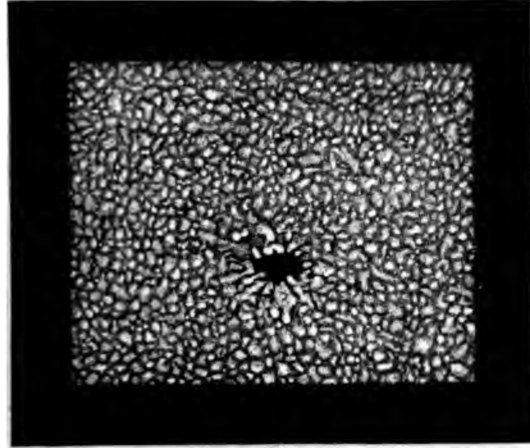


présente une facule remarquable observée au Collége Romain.

Si l'on veut connaître cette structure d'une manière plus précise, il faut renoncer aux projections, et examiner directement le Soleil, avec un oculaire puissant, et dans un moment où l'atmosphère est parfaitement calme. Alors on voit que la surface est recouverte d'une multitude de petits grains, ayant presque tous les mêmes dimensions, mais des formes très-différentes, parmi lesquelles l'ovale semble dominer. Les interstices très-déliés, qui séparent ces grains, forment un réseau sombre, sans être complétement noir. Dans la

fig. 18, nous avons essayé de faire une esquisse qui représentât l'aspect caractéristique de la surface, car

Fig. 18.



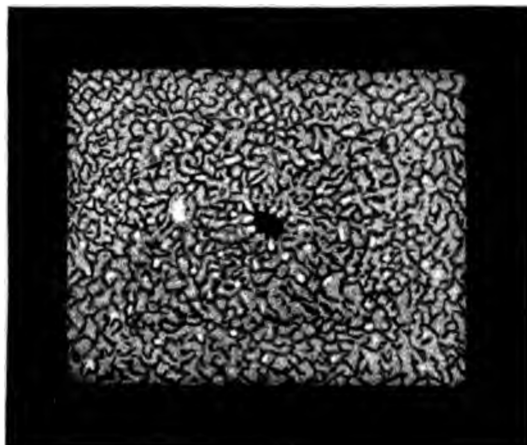
les détails sont impossibles à reproduire. Il nous semble difficile de trouver un objet connu qui rappelle cette structure; on obtient quelque chose d'analogue en regardant au microscope du lait un peu desséché, dont les globules ont perdu la régularité de leur forme.

Ces grains se réunissent quelquefois en petits groupes, et forment alors une masse plus brillante, comme on le voit dans la *fig.* 19. Leur forme ovale les a fait comparer à des grains de riz. M. Nashmyth les avait appelés feuilles de saule; mais leur forme rappelle plutôt celle des grains de riz, bien qu'en réalité elle soit très-irrégulière.

Cette structure n'a pu être remarquée qu'avec des instruments à grande ouverture, car les grains ayant

de très-faibles dimensions, la diffraction en les amplifiant et les faisant empiéter les uns sur les autres, produit nécessairement une confusion générale. Les di-

Fig. 19.



mensions réelles de ces grains ne sont pas faciles à déterminer, à cause de la difficulté de les fixer individuellement sous le fil du micromètre. On ne peut y réussir qu'en comparant leurs diamètres à ceux des fils micrométriques, et on les évalue à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde.

On peut les mesurer directement lorsqu'ils se pressent aux environs des pores ou des très-petites taches. Alors ils ne sont plus ronds, mais ils semblent s'allonger et prendre la forme de petites feuilles ayant leur grand axe dirigé vers le centre de l'ouverture. Tel est le cas de la petite tache de la *fig.* 18, observée le 10 août 1865. Cette tache était presque ronde; elle avait un diamètre de 6″,38; son périmètre contenait de 24 à 32 de ces petites feuilles, il était difficile de

les compter d'une manière plus précise; leur largeur était donc, en moyenne, de o",6 à o",8; et si nous tenons compte de l'espace qui les séparait les unes des autres, espace qui est bien égal au tiers de chacune d'elles, il reste pour leur largeur un tiers de seconde, ou une demi-seconde.

Ces nombres sont certainement exagérés, car les grains sont toujours plus petits que les feuilles, et de plus, leur diamètre est toujours amplifié par la diffraction. Chaque point lumineux produit ici un phénomène analogue à celui que présentent les étoiles; l'angle qu'elles sous-tendent est réellement nul, et par conséquent elles devraient se présenter à nous comme de simples points; et cependant les meilleures lunettes nous les montrent comme de petits cercles dont les dimensions sont très-appréciables. L'instrument que nous employons leur donne un diamètre apparent que nous évaluons à $\frac{1}{3}$ de seconde, car deux étoiles de grandeur moyenne plus voisines, au lieu de se séparer, se confondent en une seule image de forme ovale.

Autant qu'on en peut juger par les observations faites jusqu'à présent, ces grains sont de véritables points lumineux, et on peut les considérer comme étant les sommets d'autant de cônes ayant à la base des diamètres de 240 à 260 kilomètres.

Les grains sont animés de mouvements sensibles, mais très-difficiles à déterminer au milieu de la masse brillante de la photosphère. C'est auprès des pores qu'on peut le constater plus commodément. Sur le bord de ces ouvertures, on voit les grains s'allonger, se mouvoir, et modifier complétement le contour des pores. Ainsi, au bout d'une demi-heure, le trou cir-

culaire représenté dans la *fig.* 19 se trouva à moitié envahi; six grains occupèrent presque la moitié de sa surface, se disposant perpendiculairement à un diamètre passant par le centre. Au bout d'une heure, la cavité avait complétement disparu.

W. Herschel avait remarqué ces granulations; il leur donnait le nom de *corrugations* ou *rides*, expression moins exacte peut-être, mais par laquelle, comme ses descriptions le montrent avec évidence, il désignait le même phénomène dont nous parlons. Il avait aussi remarqué le réseau sombre qui sépare les grains, et il le désignait par le mot *indentation*. Il eut bientôt formé une théorie pour expliquer ces apparences. Pour lui, les points brillants *a* (*fig.* 20) étaient les sommets des

Fig. 20.



cônes de flammes dont le Soleil serait couvert, tandis que le demi-jour *b* du réseau obscur s'expliquerait par les nuages planétaires dont il admettait l'existence : *c* est le noyau solaire obscur. La figure est celle qu'il a donnée dans les *Philosophical Transactions* (1802), pour expliquer son idée.

Cette explication ne saurait être admise, à l'excep-

tion de la première partie qui est très-naturelle, sauf qu'elle paraît supposer une régularité que nous n'avons pas toujours observée. En effet, nous avons dit que la matière lumineuse du Soleil est analogue aux brouillards ou aux nuages; dès lors, il est bien naturel d'admettre que les grains sont les sommets des mamelons arrondis terminant ces masses vaporeuses qui flottent comme nos *cumuli*, dans l'atmosphère solaire. Rien n'est plus commun, même sur la Terre, que de voir, du sommet d'une montagne, des brouillards et des nuages produire un effet semblable; les dimensions énormes de ces corps solaires, présentant une étendue de plusieurs centaines de kilomètres, ne peuvent que rendre cette explication plus plausible. Dans tous les cas, on doit regarder comme certain que les grains sont les sommets de proéminences relativement petites, qui recouvrent la surface du Soleil, car on ne voit bien cette structure que vers le milieu du disque, ainsi que Herschel l'avait déjà remarqué; elle disparaît auprès des bords, parce que ces masses coniques se masquent l'une l'autre, ce qui empêche de voir les interstices auxquels est dû le réseau noir.

Nous avons dit que les grains s'allongent dans le voisinage des pores. Ce phénomène est-il réel ou bien n'est-ce qu'une apparence? On peut soutenir chacune de ces deux hypothèses; peut-être que ces grains, pressés par ceux qui les environnent, tendent à s'allonger réellement pour remplir l'espace laissé vide, comme nous l'observons quelquefois pour les nuages qui flottent dans notre atmosphère; peut-être aussi les cônes lumineux s'inclinent-ils vers l'ouverture voisine, sans s'allonger réellement. Nous reviendrons

bientôt sur cette question pour la traiter avec de nouveaux détails.

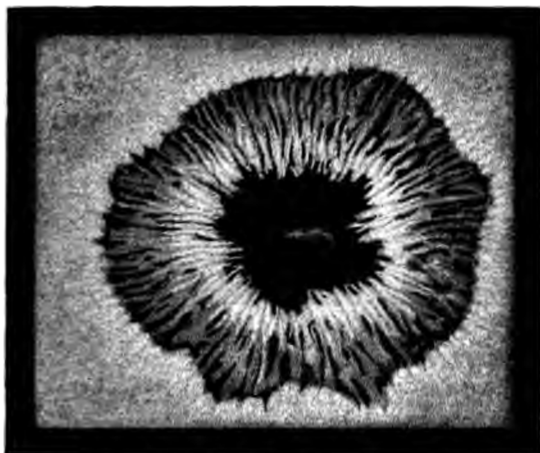
La surface du Soleil est quelquefois tellement recouverte de ces granulations, le réseau est tellement prononcé, qu'on serait tenté de voir partout des pores et des rudiments de taches. Mais cet aspect n'est pas constant, et il en faut chercher la cause, non-seulement dans les variations de notre atmosphère qui rendent quelquefois les observations difficiles, mais aussi dans les modifications qu'éprouve le Soleil. Du reste, il faut le reconnaître, ces petites granulations sont les particularités les plus difficiles à observer, à cause de l'échauffement assez rapide de l'objectif et du tube. M. Nashmyth assure qu'en supprimant le tube de sa lunette il distinguait beaucoup de détails qui lui échappaient sans cette précaution.

§ II. — *Formation des taches.*

Le temps nécessaire à la formation d'une tache est extrêmement variable, et il est impossible d'y découvrir aucune loi : quelques-unes se forment très-lentement, d'autres apparaissent presque subitement. Cependant, si l'on observe le Soleil tous les jours avec beaucoup de soin, on reconnaît que cette formation n'est jamais complétement instantanée, quelque rapide qu'elle puisse être. Le phénomène est toujours annoncé quelques jours d'avance; on aperçoit dans la photosphère une grande agitation qui se manifeste tantôt par des facules, tantôt par des pores et par un amincissement de la couche lumineuse qui les sépare; ces pores se déplacent d'abord avec rapidité, puis, l'un

d'entre eux semble prendre le dessus, et se transforme en une large ouverture. Aux premiers instants de la formation, il n'y a point de pénombre nettement définie; elle se développe progressivement et devient régulière à mesure que la tache elle-même prend une forme arrondie comme on le voit dans la *fig.* 21.

Fig. 21.

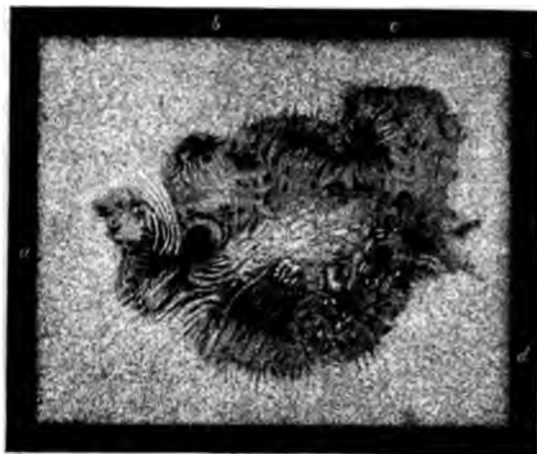


Cette formation tranquille et paisible ne se réalise qu'à des époques où le calme semble régner dans l'atmosphère solaire; en général, le développement est plus tumultueux et plus complexe. Donnons-en quelques exemples seulement, car nous pourrions les multiplier à l'infini, et les observateurs qui voudront s'adonner à ce genre de recherches ne tarderont pas à en trouver eux-mêmes un très-grand nombre, tous très-capricieux et très-différents les uns des autres.

Nous choisirons, pour premier exemple, la tache qui parut le 30 juillet 1865 (*fig.* 22).

Le 28 juillet, on n'apercevait en cet endroit rien d'extraordinaire, ni pores, ni facules. Le 29, il y avait

Fig. 22.



simplement trois points noirs. Le 30 à $10^h 30^m$, nous fûmes bien surpris de trouver un tache énorme correspondant à peu près au centre du disque. Le diamètre moyen de la partie troublée était de 76 secondes, c'est-à-dire quatre fois et demie environ le diamètre de la Terre. Au centre, nous apercevions une masse de matière lumineuse qui semblait tourbillonner, et autour de laquelle s'étaient produites de nombreuses déchirures. Au milieu de ce chaos, on pouvait distinguer quatre centres principaux de mouvement. A gauche, en *a*, se présentait une vaste ouverture; autour d'elle des langues de feu tournoyaient en différents sens, et au milieu de ces langues, on distinguait nettement des voiles à moitié lumineux qui environnaient une cavité plus noire.

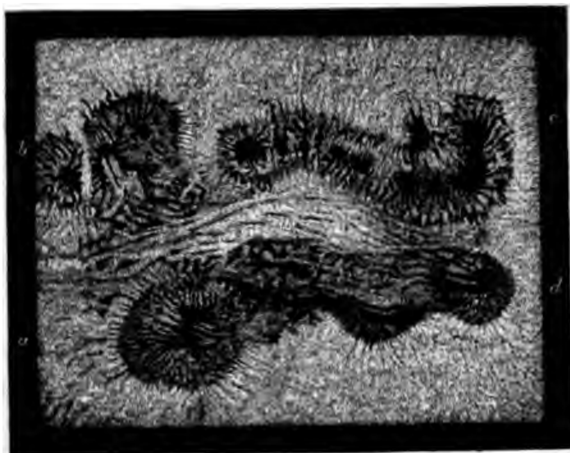
Au-dessus, en *b*, se trouvait un second centre, plus petit que le premier, dont le bord supérieur était nettement tranché, mais ayant à sa partie inférieure un grand nombre de petites langues de feu analogues aux précédentes. A droite, en *c*, une large fente présentait grossièrement la forme d'une S ; elle était parsemée de langues de feu et de traits lumineux détachés. Enfin, à la partie inférieure, au niveau du point *d*, on voyait une autre fente allongée et recourbée, offrant à l'œil un désordre qui défie toute description. Entre ces quatre cavités, il y avait un amas de facules et de matière lumineuse présentant l'aspect d'une masse en ébullition.

Tout cet ensemble était animé de mouvements tumultueux et extrêmement rapides. On fit le dessin le plus promptement possible, mais il n'était pas encore terminé, que la première partie avait déjà complétement changé de forme. Le soir, on fit un second dessin, mais il ne ressemblait au précédent que par le caractère fondamental ; au centre, une matière photosphérique très-agitée ; autour, une couronne de gouffres béants, dont les quatre principaux subsistaient encore, occupant sensiblement la même place.

Le lendemain, l'aspect était complétement changé. La *fig.* 23 donne une idée de la nouvelle disposition. On reconnaît encore les quatre centres principaux, mais ils sont comme alignés deux à deux, et rejoints par des crevasses sinueuses. La cavité *b* est déjà bien marquée, et séparée de la grande fente par un isthme composé de matière photosphérique à l'état normal Les deux points inférieurs, *a* et *d*, sont encore réunis, mais mieux dessinés ; la masse intermédiaire est

comme étirée, et son aspect rappelle celui d'une boule de coton cardé qu'on allongerait en le tirant des deux

Fig. 23.



côtés. Cette comparaison est la seule qui puisse exprimer les apparences que nous avons essayé de reproduire dans le dessin. En vingt-quatre heures, les dimensions s'étaient considérablement modifiées; la longueur avait presque doublé : elle était de 147 secondes. Les jours suivants, la masse qui séparait les quatre ouvertures se transforma à peu près en une pénombre sur laquelle étaient dispersés des grains lumineux.

Nous regrettons de ne pouvoir donner ici la série complète des dessins que nous avons exécutés chaque jour avec beaucoup de soin, mais nous reviendrons plus tard sur quelques détails intéressants et très-instructifs. Deux mots seulement pour terminer l'histoire de cette tache. — Les centres s'isolèrent et se

prononcèrent de plus en plus; l'intervalle qui les séparait resta couvert de petites taches isolées. Le 27 août, c'est-à-dire après une rotation complète du Soleil, la grande ouverture en forme d'S subsistait encore au point *c*; les centres *a* et *b* étaient encore nettement dessinés à la partie antérieure. Ce jour là, il semble qu'il y ait eu une recrudescence dans la perturbation; entre les centres *a* et *b*, et les deux autres *c* et *d*, il y avait une distance de plusieurs minutes. Le 17 septembre, après une nouvelle rotation, on voyait simplement des pores et des facules. Enfin, après une troisième rotation, il ne restait plus de trace de cette immense perturbation qui avait agité l'atmosphère du Soleil.

Citons encore un exemple. Le 29 mai 1865, nous observions une tache dont les dimensions n'avaient rien d'extraordinaire : elle mesurait environ 50 secondes (*fig.* 24).

Fig. 24.



Elle présentait, rangés autour d'une masse centrale, un grand nombre d'orifices séparés les uns des autres par des filets lumineux, dont la disposition ressem-

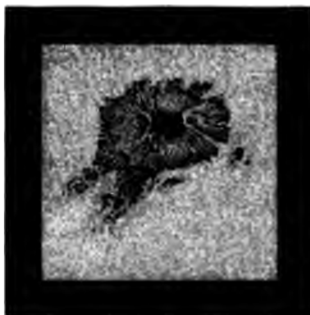
blait à celle des rayons d'une roue qui, partant de l'axe, se dirigent vers la circonférence. Ces noyaux étaient parsemés de voiles et de petits grains détachés dont quelques-uns étaient disposés en spirale. Le soir quelques rayons avaient disparu, et la spirale était dirigée en sens contraire. Le 30 (*fig.* 25), il ne res-

Fig. 25.



tait que trois rayons. Le 31 (*fig.* 26), il n'y avait plus

Fig. 26.



au centre de matière photosphérique; il en restait seulement quelques bandes recourbées en forme

d'anses, ne se rejoignant pas au centre. Les jours suivants, la masse se divisa, et le 3 juin, il s'était définitivement formé deux taches isolées, ayant des formes arrondies, mais peu régulières.

Ces phénomènes sont très-intéressants, et nous pouvons déjà en tirer une conséquence : c'est que la forme ronde est pour ainsi dire la forme normale à laquelle parviennent toutes les taches lorsqu'elles sont complétement formées. Après être passées par cette forme, elles sont de nouveau envahies par des filets brillants qu'on appelle des *ponts*, et par la matière lumineuse qui part des bords et envahit le centre. Mais ce phénomène est très-complexe; qu'il nous suffise de l'indiquer en ce moment, et réservons-nous de l'étudier plus tard en détail.

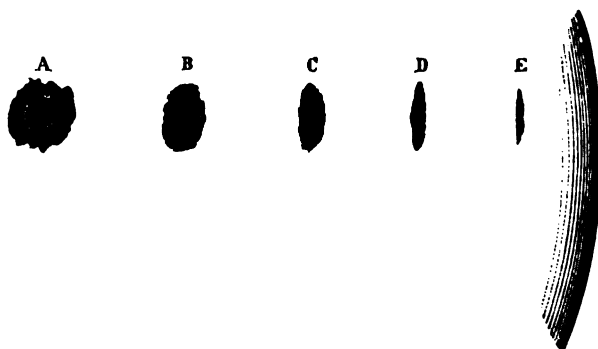
La description qu'on vient de lire montre que le phénomène des taches n'est pas purement superficiel; il a son siége dans les profondeurs de la masse solaire qu'il remue et bouleverse dans une étendue quelquefois très-considérable. Nous verrons quelques-uns de ces mouvements s'étendre jusqu'au quart du diamètre du disque solaire! Toutes les perturbations ne produisent pas le même effet, et elles pourront quelquefois manifester leur existence par de simples facules. Les taches ne sont donc que les conséquences d'une forte agitation dans la matière qui compose le Soleil, et si nous voulons trouver la cause de ces crises, il faut commencer par étudier le phénomène lui-même, et les lois qui président à ses manifestations.

§ III. — *Les taches sont des cavités.*

Il y a environ un siècle que Wilson, par des observations bien dirigées et bien interprétées, fit connaître la véritable nature des taches, en montrant qu'elles sont dues à des cavités dont il put même mesurer la profondeur. Il rendit compte de ces observations dans les *Transactions philosophiques* de Londres, t. LXIV, année 1774.

Le 22 novembre 1769, le docteur Wilson observa sur le disque solaire une belle tache ronde environnée d'une pénombre également circulaire, concentrique au noyau. Il suivit cette tache jusqu'à sa disparition, et il remarqua bientôt que la pénombre cessait d'être symétrique; la partie tournée vers le centre du Soleil devint de moins en moins large, et finit par disparaître complétement, tandis que la partie opposée conservait à peu près les mêmes dimensions. Ainsi, dans la *fig.* 27, supposons que A représente une tache pla-

Fig. 27.



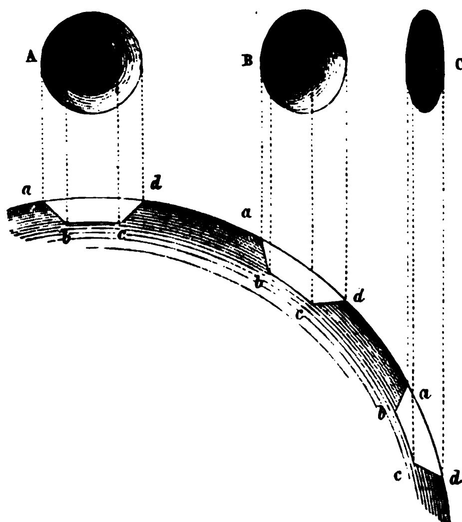
cée au centre du disque, et ayant une pénombre symétrique par rapport au contour du noyau; lorsqu'elle sera arrivée vers le milieu du rayon, elle se présentera comme en B; plus tard, la pénombre disparaîtra complétement du côté gauche, comme on le voit en C; au point D, le noyau lui-même sera entamé; enfin, tout près du bord, en E, il ne restera plus qu'un mince filet de pénombre, le noyau aura complétement disparu. Tel est le phénomène observé par Wilson, et souvent étudié depuis.

A la rigueur, ces changements pouvaient n'être que des apparences; les taches sont si capricieuses dans leurs variations, qu'on ne peut fonder aucune théorie sur un fait isolé. Cependant Wilson avait soupçonné là quelque grande loi de la nature, et, pour n'être pas induit en erreur, il attendit le retour de la même tache qui, en effet, reparut au bout de quatorze jours sur le bord oriental. Alors, il observa de nouveau le même phénomène; les mêmes phases se reproduisirent, depuis le bord du disque solaire jusqu'à son centre, où la pénombre se montra de nouveau symétrique par rapport au contour du noyau.

Désormais le doute n'était plus possible; la tache avait sensiblement conservé la même forme dans son mouvement, et les changements observés étaient de pures apparences résultant d'un effet de perspective très-facile à expliquer. Soit *abcd* (*fig.* 28) une cavité ayant la forme d'un tronc de cône, *ad* et *bc* étant les diamètres des deux bases. Vue dans une direction perpendiculaire à *ad*, cette cavité présentera un contour symétrique A; mais si on la regarde obliquement, comme en B, le côté *ab* se rétrécira dans

la projection, le côté *cd* s'élargissant un peu, ou restant sensiblement constant si la cavité est peu pro-

Fig. 28.

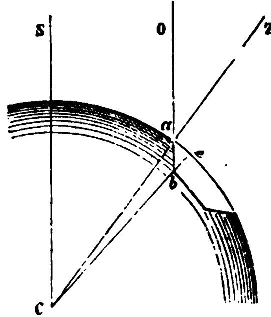


fonde. Enfin, l'obliquité augmentant, le bord *ab* se projettera sur le fond *bc* comme on le voit en C; il pourra même le recouvrir complétement.

Ces différentes phases seront d'autant plus sensibles que la cavité sera plus profonde; mais si elle est très-superficielle, le fond ne disparaîtra que pour une très-grande obliquité, ce qui, dans le Soleil, n'aura lieu qu'auprès du bord; alors l'observation sera très-difficile et exigera de très-bons instruments. On comprend cependant qu'elle soit possible, et, si elle est bien faite, elle pourra servir à déterminer la profondeur de ces cavités d'après les dimensions relatives de la pénombre et le moment où elle touche le noyau.

Soient CS (*fig.* 29) le rayon visuel dirigé vers le centre du Soleil; O*ab* le rayon qui rase à la fois le

Fig. 29.



bord de la cavité et celui du noyau, au moment où la pénombre va disparaître; CZ une droite passant par le centre du Soleil et par le bord extérieur de la pénombre. On peut toujours connaître l'angle SCZ, et de là déduire la valeur de l'angle *bae* qui en est le complément. Si l'on a mesuré la largeur de la pénombre *ae*, le petit triangle *abc* fera connaître la profondeur *be* de la tache. Wilson trouva ainsi que cette profondeur n'égale pas le rayon de la Terre.

Tous les astronomes postérieurs à Wilson ont répété ses observations avec d'excellents instruments et sur un très-grand nombre de taches. Herschel en parle souvent; et nous avons eu, ainsi que beaucoup d'astronomes encore vivants, l'occasion de confirmer cette découverte par nos propres observations. Les résultats numériques que nous avons trouvés, ainsi que ceux de M. Tacchini, diffèrent à peine de ceux de Wilson. M. Warren de la Rue, astronome anglais, discutant les observations photographiques faites à

Kew, a trouvé que sur 89 taches, 72 donnent des résultats conformes aux idées de Wilson, tandis que les 17 autres se comportent autrement. Cette proportion n'a rien de surprenant lorsqu'on songe aux variations considérables que les taches subissent en réalité dans leurs formes. M. de la Rue a imaginé un moyen bien simple de montrer que les taches sont des cavités. On prend deux photographies du Soleil faites en deux points distants d'environ 15 degrés; on les place dans un stéréoscope, et l'on voit parfaitement la cavité intérieure, dont les bords sont relevés au-dessus de la photosphère environnante, ainsi que nous le reconnaîtrons plus tard. Il est donc impossible de douter de cette structure.

Lorsqu'une tache formée par une cavité se présente sur le contour apparent du Soleil, on devrait apercevoir sur le bord du disque une échancrure d'autant plus facile à observer que la cavité est plus profonde. En réalité, cette observation est rendue difficile par un certain nombre de circonstances, et surtout par la petitesse relative de ces cavités. Cependant, pour les taches considérables, on a pu constater des dépressions sensibles; aussi la découverte de Wilson doit-elle être considérée comme un fait acquis à la science; il ne peut y avoir de difficulté que pour la manière précise de l'interpréter.

Wilson suppose que les taches étant évidemment des cavités, leur pénombre était formée par le talus de ces cavités mêmes. Il imaginait que la matière lumineuse du Soleil étant fluide, descendait comme une lave dans cette espèce de gouffre, dont les bords inclinés formeraient la pénombre. Et pour confirmer son

interprétation, il rappelait le fait suivant. Le contour de la pénombre est généralement parallèle à celui du noyau; quelquefois cependant il présente à l'intérieur des angles rentrants qui correspondent à des angles saillants du contour extérieur, comme si un éboulement du talus avait fait tomber dans le gouffre une partie de la matière lumineuse. Cette disposition est reproduite dans plusieurs de nos dessins, et en particulier dans la *fig.* 21.

Cette observation délicate de Wilson est exacte, et on la vérifie souvent. Mais on ne peut pas admettre que la seule inclinaison du talus suffise à expliquer la pénombre. L'intensité lumineuse de la pénombre est à peu près la moitié de celle qu'on observe sur le reste du disque. Or une différence aussi grande serait à peine possible, s'il s'agissait d'une surface éclairée par un corps étranger. A plus forte raison est-elle impossible pour un corps lumineux par lui-même. Nous compléterons bientôt la théorie de Wilson, et nous verrons qu'il y manquait peu de chose. Il lui fut impossible, avec ses instruments, d'étudier la structure de la pénombre, et c'est de là que dépendait la solution du problème.

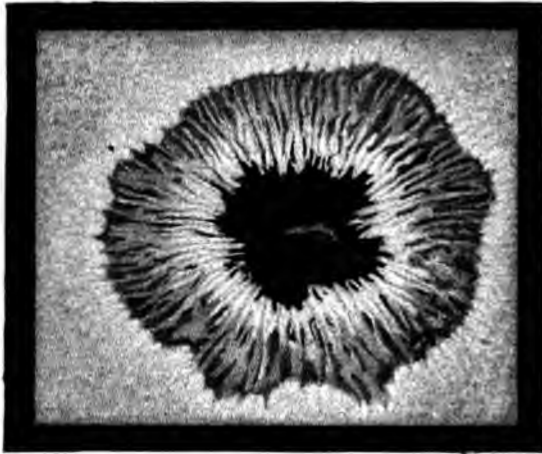
§ IV. — *Structure des taches.*

Nous avons vu que la forme des taches est très-variable. Elles finissent, en général, par devenir rondes, mais c'est pour ainsi dire une forme limite qu'elles ne conservent pas bien longtemps; bientôt elles se rétrécissent, reprennent l'apparence de pores et ne tardent pas à se fermer complétement. Avant de disparaître,

quelques-unes se divisent, et on remarque souvent alors une recrudescence d'action qui élargit l'ouverture ou en forme quelque autre dans le voisinage. Entrons dans l'examen détaillé de ces phénomènes, et pour en comprendre le mécanisme, étudions d'abord la structure intérieure.

Commençons par la période de tranquillité. Alors les taches présentent la forme ronde ou ovale que nous avons déjà indiquée, et que nous reproduisons dans la *fig.* 30.

Fig. 30.



Nous ferons ici plusieurs remarques :

1° La pénombre a une largeur à peu près égale au tiers de la tache; mais elle est loin d'être uniforme dans sa structure, et d'avoir son contour extérieur parallèle à celui du noyau, comme le montrent les dessins qui se trouvent dans la plupart des livres. Cette pénombre est toute rayonnée, mais les rayons ont des formes

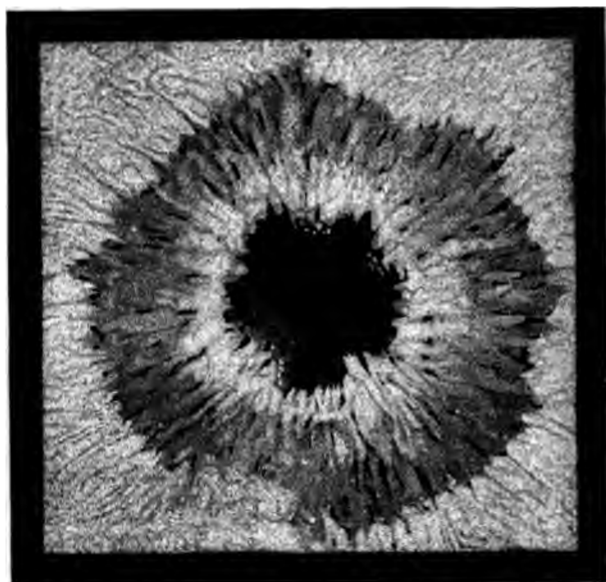
irrégulières; quelques-uns ressemblent à des courants sinueux, et vont en s'élargissant à mesure qu'ils s'éloignent du centre; ils sont, pour la plupart, composés de feuilles ou d'espèces de nœuds allongés, placés bout à bout, de manière à simuler un courant à peu près continu. Cette structure rayonnante de la pénombre est très-constante; elle avait déjà été remarquée par Capocci, par Pastoroff et par sir John Herschel. Cette observation exige quelquefois un instrument puissant à large ouverture; cependant, lorsque l'air est calme, on la voit ordinairement sans difficulté.

2° Ces courants sont moins condensés, moins lumineux, et semblent moins épais dans la région extérieure de la pénombre, à l'endroit où ils se détachent de la photosphère; tandis que, dans le voisinage du noyau, ils se pressent, se condensent et deviennent plus brillants; d'où il résulte que la partie intérieure est notablement plus éclairée. Cette région acquiert quelquefois un tel éclat, qu'on peut la comparer à la photosphère, et la tache semble alors formée de deux anneaux concentriques également brillants. Ce n'est pas là un effet de contraste, mais une condensation réelle de la matière lumineuse. Ce fait est très-important, et les physiciens ne l'ont pas assez remarqué, quoique les observateurs l'aient exactement représenté dans leurs dessins. Nous en trouvons un autre exemple dans la tache du 16 juillet 1866 (*fig.* 31).

3° Le contour de la pénombre est environné d'un anneau plus brillant que le reste de la photosphère; ce phénomène déjà bien sensible au centre du disque solaire, lorsqu'on observe avec un hélioscope gradué,

devient extrêmement remarquable lorsque les taches approchent du bord. On voit alors une espèce de

Fig. 31.



couronne lumineuse de laquelle, ordinairement, partent des ramifications très-irrégulières, qui ressemblent à de véritables proéminences et forment un bourrelet bien tranché. Nous représentons dans la *fig.* 32, une de ces taches dessinées à Palerme, par M. Tacchini, le 3 décembre 1865.

Elle ressemble dans ses détails à un cratère lunaire, et c'est pour cela que nous appellerons ces taches rondes des *cratères*, sans cependant y attacher pour le moment aucune idée qui rappelle les éruptions volcaniques.

. Le 14 mars 1866, une grande tache ronde s'approchait du bord. Elle était entourée d'une belle facule

Fig. 32.



d'où rayonnaient plusieurs ramifications; deux d'entre elles formaient presque un second cratère. Lorsque ces deux branches furent sur le bord du Soleil, on vit nettement une proéminence d'environ une seconde se dessiner sur le contour du disque. Le même phénomène se répéta le 29 juin suivant.

Il est donc impossible de douter que ces facules que l'on voit souvent autour des taches, surtout lorsquelles sont près du bord, ne soient de véritables proéminences. Le cratère qui a donné lieu à cette observation est représenté dans la *fig.* 33.

Au bord intérieur de la pénombre, la tête du courant est ordinairement projetée sur le fond noir du noyau; mais souvent il y a des voiles qui les dépassent et couvrent une partie du noyau lui-même, comme on le voit dans la *fig.* 34. Mais dans la partie la plus éloignée du noyau, les courants composés de

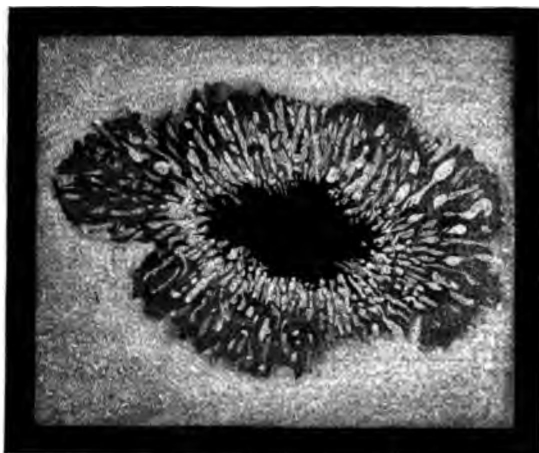
grains lumineux se dessinent sur un fond voilé ou à demi éclairé.

Fig. 33.



La *fig.* 34 montre une de ces pénombres formées

Fig. 34.



d'un voile à demi lumineux sur lequel sont projetés des grains brillants entraînés vers le centre. On voit également ces grains isolés et détachés sur le fond noir du noyau. Ces voiles se retrouvent encore dans

le centre *a* de la grande tache observée le 30 juillet 1865 (*fig.* 22). Les courants composés de grains ou de feuilles qui envahissent le noyau ne tardent pas à se dissoudre; il suffit de quelques heures, ou même de quelques minutes. Aussi malgré cet afflux continu de matière lumineuse, le noyau reste toujours noir et persiste très-longtemps. La *fig.* 21 montre une de ces feuilles détachées qui est à demi dissoute; c'est un phénomène assez fréquent, dont nous pourrions donner de nombreux exemples. Du reste, il n'est pas particulier aux feuilles qui composent les courants, mais il a quelquefois lieu pour une grande partie de la masse environnante. Nous avons déjà vu que, dans la tache du 29 mai 1865 (*fig.* 26), les masses photosphériques emprisonnées dans le noyau avaient fini par se dissoudre. Mais il y a un fait qui prouve bien un certain pouvoir d'attraction exercé par les taches, c'est l'absorption des petites par les grandes. On les voit se rapprocher peu à peu de la cavité principale, dans laquelle elles disparaissent bientôt. Ce phénomène a quelques rapports avec celui du mouvement propre des taches, dont nous parlerons plus tard.

Les cratères présentent quelquefois, à leur intérieur, un mouvement tourbillonnant très-rapide semblable à celui qu'on remarque au point *a*, dans la tache du 30 juillet 1865 (*fig.* 22). Ce mouvement est très-prononcé dans une tache du 5 mai 1854, que nous observions à Rome pendant que M. Fearnely l'observait à Christiania. On voyait un grand nombre de flammes enroulées en spirales tournoyer dans son noyau; au bout de deux heures, elles étaient complétement dissoutes.

Nous reproduisons dans la *fig.* 35 une tache observée le 25 septembre 1865, dans laquelle les courants

Fig. 35.



montrent, par leur disposition, qu'ils sont animés d'un mouvement rotatoire très-prononcé, mais dans une partie de la pénombre seulement ; car, dans toute la partie qui est à droite, les courants sont dirigés comme à l'ordinaire, de manière à converger vers le centre. En réalité, nous n'observons ces tourbillons qu'au commencement, et dans la période de formation, comme nous l'avons déjà remarqué à propos de la tache du 30 juillet 1865. On a souvent cru voir des tourbillons dans des phénomènes qui ne sont que de simples changements de forme, sans aucun mouvement de rotation.

La *fig.* 35 est encore intéressante à un autre point de vue, car nous y trouvons la structure que l'astro-

nome Dawes a nommée *thatched straws, couverture de paille*, à cause des faisceaux de filets parallèles qui représentent assez bien un toit de chaume. Cette comparaison n'est pas très-heureuse; cependant elle exprime assez bien la disposition des filets. Ils sont en général un peu tortueux, renflés à une extrémité en forme de massue, ou plutôt comme des courants de lave retardés dans leur mouvement par la résistance du milieu qui les environne. Leur forme est en général la suivante (*fig.* 36) :

Fig. 36.



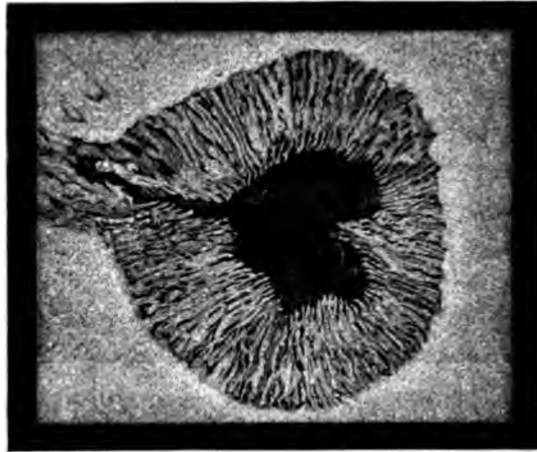
Nous avons cherché à déterminer l'épaisseur de ces filets; nous avons trouvé que l'extrémité renflée a une largeur de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde, ce qui fait 200 ou 300 kilomètres. Le reste de la tige peut avoir de 100 à 200 kilomètres de largeur.

On aura sans doute remarqué dans la *fig.* 35 une espèce de queue composée d'une foule de petites taches irrégulières, entremêlées de matière lumineuse, et irrégulièrement disposées dans la pénombre. Ces queues sont très-fréquentes, et elles se trouvent toujours dans ce que nous appellerons la partie *postérieure* de la tache, c'est-à-dire dans la partie qui se trouve en arrière par rapport au mouvement de rotation du Soleil.

La *fig.* 37 représente une tache vue le 16 janvier

1866 à $1^h 45^m$; le noyau se prolonge dans la partie postérieure d'une manière remarquable et exception-

Fig. 37.



nelle; ordinairement le noyau est fermé, mais en arrière on voit toujours une queue composée tantôt de petites taches isolées, tantôt de facules. M. de la Rue a examiné 1137 taches photographiées à Kew: 584 présentaient ces facules à gauche, c'est-à-dire dans la partie postérieure; 508 avaient leurs facules régulièrement disposées sur leur contour; 45 seulement avaient une espèce de queue vers la droite, c'est-à-dire dans leur partie antérieure. Cette disposition n'est certainement pas accidentelle. Nous verrons que les taches ont une tendance prononcée à se porter en avant, dans le sens de la rotation du Soleil; les facules correspondraient donc à la région bouleversée

que la tache vient de quitter, et qui se trouve à sa gauche.

La *fig.* 37 contient encore des détails importants. L'extrémité des filets n'est pas seulement renflée, mais elle est aussi légèrement recourbée en forme de crochet, ce qui semble confirmer l'idée d'une résistance au mouvement. Le noyau est recouvert d'un voile assez sensible, laissant une trace noire du côté de la queue, tandis qu'une partie de la région antérieure est recouverte de voiles roses; cet ensemble fait que la figure représente assez bien l'aspect d'une torpille.

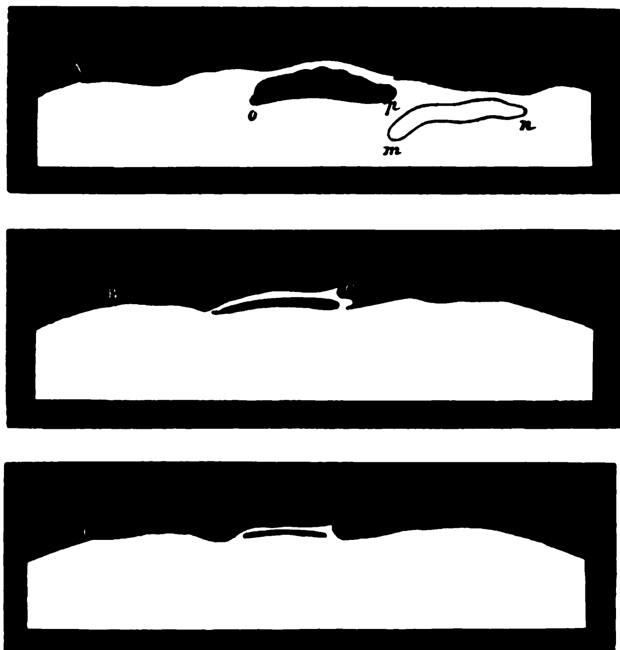
Lorsque la tache du 30 juillet fut arrivée près du bord solaire, nous la surveillâmes avec soin, mais la première partie disparut le 5 août au soir, et l'air était alors si agité, qu'il nous fut impossible de rien observer. Le lendemain l'air était calme et le ciel parfaitement pur; la tache fut dessinée simultanément par trois observateurs. M. Tacchini, de Palerme, était alors à notre observatoire, et il fit lui-même le dessin que nous reproduisons (*fig.* 38 A). Il était 9 heures; l'un des cratères était près du bord, et on voyait nettement son contour former une proéminence au-dessus du disque solaire, en laissant deux échancrures, une de chaque côté. Sur le côté on voyait une vaste facule *mn*. Cette partie du contour était déprimée au-dessous de la surface générale du Soleil, dans une région où, peu de temps auparavant, on distinguait une vaste pénombre.

A $10^h 20^m$, le cratère était considérablement rétréci (*fig.* 38 B), et présentait plusieurs pointes très-aiguës; on en distinguait une, *a*, que tous les observa-

teurs remarquèrent à cause de ses dimensions et de sa forme recourbée.

$10^h 32^m$. L'intérieur du cratère était réduit à une

Fig. 38.



ligne très-mince qui disparut à 11 heures; le contour du Soleil conservait encore sa structure dentelée (*fig*. 38 C).

L'ensemble de ces phénomènes rappelle parfaitement ceux que présente la Lune lorsqu'elle est presque pleine, et qu'un cratère se présente au bord de son disque. Nous devons reconnaître qu'on rencontre rarement des circonstances favorables à ces sortes d'observations, car pour obtenir une dépression d'une se-

conde sur le contour du disque, il faut une tache ayant une amplitude héliocentrique de 3 degrés, et une différence de niveau de 720 kilomètres. Aussi lorsque les taches ne sont pas très-vastes, il est impossible de rien voir; la dépression reste couverte par ses propres bords; l'ondulation du limbe solaire et l'indécision de ses contours masquent les détails très-délicats des proéminences ordinaires. C'est pour la même raison qu'il est difficile de relever sur le contour de la Lune des aspérités qui sont relativement bien plus considérables.

Les détails dans lesquels nous sommes entré nous conduisent à admettre comme démontrées les propositions suivantes :

I. Les taches sont des cavités ou lacunes dues à des déchirures qui ont lieu dans la photosphère. Ces déchirures, d'abord irrégulières, finissent par prendre une forme ronde et régulière. Si l'on suppose que l'intensité de la lumière diminue proportionnellement à la profondeur, nous pouvons nous représenter la forme des cratères comme l'indique la *fig*. 39.

Fig. 39.



II. Le centre de ces cavités est le siége d'une force d'aspiration, qui attire les masses environnantes, les absorbe et les dissout. Pour expliquer ce phénomène

important, on peut admettre deux hypothèses. 1° Le mouvement d'absorption serait produit par un courant de gaz sortant de l'intérieur même du Soleil, et plus chaud que la photosphère. L'aspiration latérale du courant suffirait pour déterminer l'appel des masses voisines, et comme les matières photosphériques sont dans un état de vapeurs condensées, en entrant dans ce courant dont la température est plus haute, elles reprendraient leur état de fluide élastique, et deviendraient invisibles en devenant transparentes. 2° On pourrait admettre que le noyau de la tache est analogue à nos cyclones; il y aurait au centre un abaissement de température; la matière photosphérique perdrait son éclat en se refroidissant et deviendrait ainsi invisible.

Les astronomes ne sont point d'accord sur cette question, et nous ne pourrons la juger qu'après avoir étudié la distribution de la chaleur dans le Soleil. Dès à présent cependant, nous pouvons regarder la première opinion comme plus probable : le mode de formation des taches semble bien indiquer une éruption de l'intérieur vers l'extérieur; de plus, comment admettre que l'intérieur du Soleil puisse contenir des gaz plus froids que la photosphère? comment admettre un abaissement de température capable de rendre invisibles des masses aussi brillantes et aussi considérables?

Il ne faudrait cependant pas croire que toutes les taches qui paraissent rondes avec un faible grossissement aient toujours une structure aussi simple que celle dont nous venons de parler. La *fig.* 40 représente une partie de la grande tache du 30 juillet, telle qu'on

la voyait le 23 août 1865. Elle présente deux cavités qui paraissent rondes toutes les deux, mais qui ont

Fig. 40.



des structures bien différentes. Dans l'une, la pénombre est remplie d'une foule de fragments recourbés; dans l'autre, la pénombre est remplacée d'un côté par une énorme facule.

Nous devons ajouter cependant que cette phase appartient à l'époque où la tache était sur le point de se fermer, et la régularité du phénomène ne subsistait plus. Il faut bien distinguer la période finale de la période de formation. Lorsqu'une tache est sur le point de disparaître, la matière lumineuse qu'elle attire n'est plus régulièrement dirigée vers le centre, et il semble qu'elle se précipite pêle-mêle dans la cavité pour la combler.

§ V. — *Nouveaux détails relatifs aux taches. — Voiles roses à l'intérieur.*

Les phénomènes que nous venons d'étudier nous ont montré que la profondeur des cavités photosphériques qui forment les taches est relativement peu considérable. D'après les mesures de Wilson et celles que nous avons faites nous-même, elle ne dépasserait pas la longueur du rayon terrestre, c'est-à-dire 6377 kilomètres. Cependant ces résultats sont assez incertains : d'un côté, ils sont peut-être exagérés, car la cavité dont on mesure la profondeur se trouve augmentée par le bourrelet de facules qui l'environne; et, d'un autre côté, ils sont peut-être trop faibles, car nous ne pouvons ni mesurer ni évaluer l'élévation de la couche photosphérique qui forme le contour du noyau et limite intérieurement la pénombre.

Nous prouverons plus loin que ces cavités ne sont pas vides, mais qu'elles sont remplies de vapeurs qui, absorbant énergiquement les rayons lumineux émanés du fond de la tache elle-même, produisent cette obscurité qui constitue le noyau. Pour le moment, contentons-nous d'étudier leurs formes en détail.

Si la photosphère a une constitution analogue à celle des nuages, si elle consiste, comme disait Wilson, dans un brouillard lumineux (et nous verrons que les découvertes modernes ne s'opposent pas à cette manière de voir), nous devons nous attendre à trouver dans sa structure tous les aspects si multipliés que présentent les nuages, et les déchirures auxquelles sont dues les taches devront présenter les formes les

plus variées. Ces déductions sont confirmées par l'observation, comme nous allons le montrer.

Les plus anciens observateurs avaient déjà remarqué que les taches qui se forment assez vite disparaissent en fort peu de temps. Quelques-unes ont probablement une cause toute superficielle, tandis que d'autres sont dues à des mouvements provenant des profondeurs du Soleil. Ces dernières durent plus longtemps, mais elles sont sujettes à de grandes variations, et on peut reconnaître des moments de recrudescence dans l'action qui les produit. En 1866, nous avons observé plusieurs taches qui ont fait jusqu'à trois et quatre révolutions, et plusieurs fois, au moment où elles étaient sur le point de disparaître, nous avons constaté cette recrudescence de la manière la plus évidente. Presque toujours ce phénomène est accompagné d'un changement de position. Quelquefois encore, nous avons vu une tache se former à l'endroit où la précédente avait disparu quelque temps auparavant. M. Carrington a constaté le même fait.

Assez souvent les taches semblent se diviser. Cette division peut n'être qu'apparente, un nouveau noyau se formant près de l'ancien, et s'en séparant de plus en plus par un mouvement rapide vers la partie antérieure. Mais souvent aussi la division est réelle, et alors elle se fait par un mécanisme bien simple : la matière lumineuse se précipite des bords, envahit l'intérieur, forme des ponts et partage le noyau en plusieurs parties Ces ponts ont un éclat très-vif et comparable à celui de la photosphère. La tache du 25 septembre (*fig.* 35) montre une de ces lignes lumineuses qui la sépare en deux parties; l'une est com-

posée d'une foule de petits noyaux, l'autre forme une seule masse noire sans division. Deux jours après, cette ligne était plus grosse, les petites taches étaient dissoutes, il y avait alors deux noyaux. Quatre jours plus tard, le pont disparut, les deux noyaux se confondirent, et il ne resta qu'une tache simple.

La *fig.* 41 montre d'une manière assez claire le mécanisme de la division par l'apparition des langues de feu qui envahissent le noyau de tous côtés.

Fig. 41.



Les anciens attribuaient ce phénomène à la rupture des croûtes solides qui, d'après eux, formaient les taches : pour soutenir une semblable théorie, il fallait ignorer la véritable structure de la photosphère et celle des parties intérieures des taches.

La division des noyaux précède ordinairement leur dissolution et leur disparition. Mais outre la division proprement dite, due à des ponts dont la matière possède un éclat comparable à celui de la photosphère, il se

présente souvent un autre phénomène que nous avons eu l'occasion de remarquer déjà, et qui demande une étude spéciale. Nous voulons parler des voiles, souvent colorés, qui apparaissent dans l'intérieur des taches, et dont nous avons un exemple dans la *fig.* 41. Ils sont assez fréquents, et si les observateurs qui nous ont précédé ne les ont pas remarqués, cela tient aux verres colorés qu'ils employaient, et qui masquent complétement la couleur des objets. Mais avec un hélioscope polariseur, nous avons presque toujours pu constater leur existence dans les grandes taches, surtout dans leur période de formation. Mais ce qui est plus important, c'est d'étudier leur origine et leur mode de développement.

Au mois de février 1866, apparut une tache énorme que nous avons suivie avec beaucoup de soin. Un trouble considérable se manifesta d'abord dans une

Fig. 42.



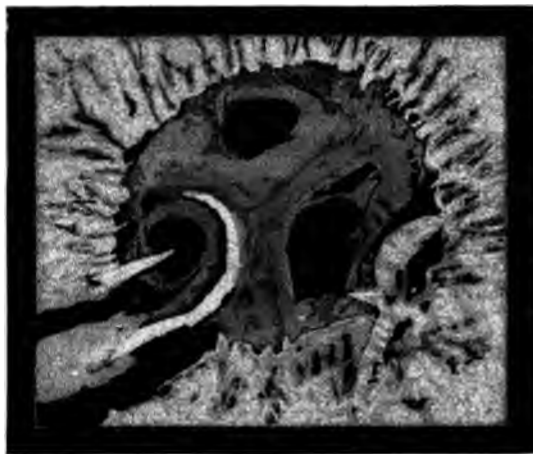
vaste région, occupant en longitude les $\frac{8}{22}$, c'est-à-dire

un peu moins du quart du diamètre solaire; aussi le phénomène était-il visible à l'œil nu. On aurait dit une immense crevasse présentant les formes les plus bizarres, parmi lesquelles semblait dominer une courbe en forme de S. Au milieu de ce chaos, nous remarquâmes une région dans laquelle apparaissaient de grandes masses de voiles rouges, comme le représente la *fig.* 42.

La partie la plus remarquable était un pont en forme d'arc ou de fer à cheval, formé d'une matière extrêmement brillante, et à l'intérieur une espèce de promontoire lumineux semblable à une facule.

Le lendemain 17 (*fig.* 43), nous trouvâmes l'arc

Fig. 43.



brisé; le tronçon était terminé en pointe mince et effilée; la partie disparue était remplacée par un voile rouge; d'autres voiles, rouges et blancs, couvraient

le reste de la tache. De l'autre côté du noyau, le grand courant qui existait la veille avait presque complétement disparu, il était remplacé par une traînée rouge. Nous avions à peine fini le dessin, que le crochet qui se trouve à gauche s'était évanoui; la base seule était encore visible, et le reste était remplacé par un voile de teinte rose.

Une question se présentait alors d'elle-même. Y a-t-il dans ces phénomènes une transformation réelle d'arcs brillants en voiles rouges, ou bien faut-il y voir une superposition purement accidentelle? Pour résoudre cette importante question, nous avons pendant longtemps, et avec beaucoup de soin, surveillé et étudié les taches, et nous avons pu nous assurer que les courants lumineux se transforment quelquefois en voiles roses.

Le 23 janvier 1866, nous examinions une tache en forme de ∞ ; deux jets de langues brillantes s'élançaient de part et d'autre, et paraissaient devoir la diviser par un pont.

La *fig.* 44 représente l'une de ces gerbes de flammes

Fig. 44.



vue à $10^h 45^m$. Cinquante minutes plus tard, les langues de feu s'étaient effilées à leur extrémité; elles présentaient la forme indiquée dans la *fig.* 45.

Au bout de dix minutes, en remettant l'œil à la lunette

Fig. 45.



on les vit transformées en voiles roses (*fig.* 46). Enfin

Fig. 46.



les voiles se dissipèrent, et à 1^h 45^m il ne restait plus qu'une gerbe de flammes plus courtes qu'au commencement (*fig.* 47).

Fig. 47.



On ne saurait donc douter de la réalité de cette

transformation. Un phénomène de cette nature ne peut s'expliquer par de prétendues illusions que produiraient les hélioscopes, car nous devons ces découvertes aux hélioscopes polariseurs qui ne sauraient colorer une partie du champ sans le colorer tout entier. De plus, il faudrait être bien mauvais observateur pour confondre, comme on a prétendu que nous le faisions, les couleurs que présentent les voiles avec les apparences qui résulteraient d'un défaut d'achromatisme dans la lunette.

Terminons en citant une dernière observation. Le 23 septembre 1866, le Soleil se trouvant dans une période de tranquillité, présentait une des plus belles taches nucléaires que nous ayons jamais vues. Son noyau, vu avec un faible grossissement, ressemblait à un ovale, ou plutôt à un losange dont les angles seraient émoussés. La *fig.* 48 la représente vue avec un

Fig. 48.



grossissement plus considérable. On y reconnaît la structure rayonnée que possède ordinairement la pénombre; le milieu est tout rempli de voiles roses et blancs, qui s'entre-croisent dans toutes les directions. Si la coloration était due à un défaut de l'appareil, comment expliquer qu'elle soit visible dans la partie centrale, où les teintes sont plus faibles, et non dans les endroits où la lumière est plus vive (1)?

Nous arrivons donc à cette conséquence, que sur la surface du Soleil il y a des amas de voiles roses analogues à ces flammes qu'on aperçoit autour du disque de la Lune pendant les éclipses solaires, et que l'on connaît sous le nom de *protubérances rouges*. De plus, ces voiles nous paraissent analogues aux *cirri*, tandis que les grains peuvent être comparés à des *cumuli*. Rien ne nous prouve que ces *cirri* forment une couche continue plus basse que les *cumuli;* nous voyons ces masses entremêlées les unes avec les autres, et il est bien difficile de déterminer leur position relative. Nous pouvons seulement affirmer que les pénombres ne sont pas exclusivement composées de voiles comme le supposait W. Herschel, mais qu'elles contiennent encore des grains et des courants qui *paraissent* superposés aux voiles.

Les ponts se présentent quelquefois comme des arcs suspendus au-dessus du noyau, ainsi qu'on le voit dans la *fig.* 49, qui représente une tache observée le 14 avril 1869, à 10 heures. Le pont principal était formé d'une double rangée de grains; l'autre paraissait sus-

---

(1) Dans ce dessin, les voiles intérieurs sont seuls représentés avec précision; les détails de la pénombre ne sont qu'ébauchés.

pendu au-dessus de la cavité. Mais on ne peut prouver que cette différence de niveau existe bien réellement. Ce qui est certain, c'est que les voiles ne forment pas, comme le supposait encore W. Herschel, une couche continue, se déchirant toujours parallèlement aux

Fig. 49.



déchirures de la photosphère, car nous avons vu fort souvent des langues de feu se projeter bien au delà des voiles, lors même que ceux-ci forment le fond de la pénombre. On doit donc rejeter l'idée d'une double couche distincte, quoique l'existence des deux espèces de nuages soit parfaitement certaine.

§ VI. — *Conclusions relatives à la structure des taches.*

D'après ce que nous avons vu, les taches sont simplement des solutions de continuité dans cette couche

de brouillards ou de vapeurs lumineuses qui forment la photosphère. Ces nuages diffèrent des nôtres en deux points : ils sont composés non de vapeur d'eau, mais de substances métalliques; et, grâce à leur température élevée, ils sont lumineux par eux-mêmes. Quant à l'aspect extérieur, il est complétement le même; la Terre entièrement couverte de nuages offrirait à un spectateur placé en dehors d'elle une structure mamelonnée analogue à celle du Soleil, et bien souvent on peut observer un semblable phénomène du sommet des montagnes. Dans beaucoup de circonstances, mais surtout dans les orages, on voit, comme dans le Soleil, des nuages en forme de *cumuli* s'allonger verticalement ou s'étendre horizontalement, suivant la direction des forces qui agissent sur eux; souvent même ils se transforment en *cirri* ou voiles vaporeux, et c'est là ce qui complète l'analogie.

Cette théorie explique, sans recourir à des vitesses fabuleuses, la rapidité avec laquelle s'exécutent certains changements de forme dans les taches. Le déplacement apparent d'un nuage peut s'expliquer sans supposer que la matière a parcouru le même espace que le contour du nuage. Il suffit pour cela d'un changement de température produisant d'une part la condensation, d'autre part la dissolution de la vapeur sur une surface très-étendue. C'est ainsi que par un temps calme nous voyons le ciel se couvrir de nuages presque instantanément, ou bien s'éclaircir avec la même rapidité, les courants d'air ayant pourtant des vitesses incomparablement plus faibles que celle du mouvement apparent des nuages. Un nuage peut même paraître immobile malgré un vent violent qui

devrait l'emporter, et l'emporte réellement avec une grande rapidité; nous en avons un exemple dans ce qu'on appelle les nuages *parasites* de nos montagnes : l'air traversant une région très-froide, sa vapeur s'y condense pour se vaporiser un peu plus loin, de sorte que la même région est toujours remplie de vapeur condensée qui se renouvelle à mesure qu'elle disparaît. De même, de la stabilité de quelques taches, on ne serait pas en droit de conclure à l'immobilité de la matière solaire.

Après les détails dans lesquels nous sommes entré relativement à la structure des taches, il nous semble impossible de les expliquer par un abaissement de température suffisant pour obscurcir l'un de ces nuages brillants. Il faudrait d'abord, comme nous l'avons déjà fait remarquer, que ces nuages fussent toujours superposés deux par deux, de manière à ce que leurs contours fussent symétriques : hypothèse inadmissible, émise d'abord par Galilée, et renouvelée dans ces derniers temps par M. Kirchhoff. D'ailleurs la température du Soleil est tellement élevée, nous le verrons bientôt, que pour produire des nuages obscurs, il faudrait supposer un refroidissement énorme qu'aucune circonstance ne pourrait expliquer.

Les difficultés que présente une question ne tiennent bien souvent qu'à la manière dont elle est posée. Pour nous, il nous semble que la question relative à la nature des taches doit être posée de la manière suivante : « Les taches sont-elles dues à une matière
» obscure se répandant au-dessus de la matière lumi-
» neuse, ou n'est-ce pas, au contraire, la matière lu-
» mineuse qui envahit un espace obscur? »

La question ainsi nettement posée doit être résolue par l'observation, et par l'étude détaillée des phénomènes que présentent les pénombres et les courants photosphériques. Or tous les phénomènes que nous avons décrits ne nous semblent explicables que par la seconde hypothèse. D'où vient cet espace obscur? Comment se trouve-t-il dans la masse incandescente du Soleil? C'est une autre question que nous discuterons plus tard; pour le moment, encore une fois, nous constatons une chose : c'est que dans les taches il existe une matière lumineuse qui se meut et envahit un espace moins brillant; il faudrait renoncer à toute évidence et à toute analogie physique, pour soutenir le contraire. Si l'on veut, on pourra bien appeler nuage la partie obscure, mais il n'en sera pas moins vrai que c'est la partie lumineuse qui cherche à pénétrer dans cette partie obscure. En suivant cette marche nous écartons la question de mots, et il ne reste que la question physique assez nettement posée, résolue en partie seulement, puisqu'il reste à décider les questions relatives aux températures que possèdent les différentes parties, à l'état et à la nature des substances qui remplissent ces cavités.

Du reste, le brouillard épais qui forme la photosphère ne se meut pas dans le vide, et il ne peut venir à la pensée de personne de croire que les taches ne contiennent aucune matière pondérable; mais elles doivent contenir une substance transparente, moins brillante que la photosphère, et de nature gazeuse. Notre atmosphère présenterait le même aspect à un observateur placé en dehors d'elle, dans la Lune par exemple; les nuages éclairés par le Soleil lui paraî-

traient brillants, tandis qu'il verrait des taches noires aux endroits où l'air serait transparent.

Encore un mot pour nous entendre. Nous n'employons point le mot *noyau* pour désigner la masse intérieure du Soleil, parce que, sous la plume d'Herschel, cette expression signifie une masse *solide* et d'une température relativement basse. Rien n'empêcherait cependant de s'en servir pourvu qu'on eût soin d'écarter en l'employant les idées qu'Herschel y attachait, et qu'il est désormais impossible d'admettre. Ainsi, après avoir écarté la question de mots, nous nous appliquerons à la solution des problèmes que nous avons énoncés, mais nous chercherons d'abord à nous faire une idée exacte des mouvements généraux qui s'observent à la surface du Soleil.

CHAPITRE IV.

MOUVEMENTS PROPRES DES TACHES. — ROTATION DU SOLEIL.

§ I. — *Importance de la question.*

A la fin du Chapitre précédent, nous avons indiqué plusieurs questions qu'il est impossible de résoudre sans savoir si les taches sont fixes sur le corps solaire, ou bien si elles possèdent un mouvement propre de translation. Il est facile de reconnaître qu'elles ne sont pas absolument fixes, à en juger par leurs transformations et les subdivisions dont nous avons donné plusieurs exemples. Mais il s'agit de savoir si, outre ces mouvements accidentels, il n'y aurait pas un mouvement systématique, les entraînant toutes dans une direction constante. Ce mouvement propre, s'il existe, se compose avec le mouvement de rotation du Soleil; et comme ce dernier ne peut être étudié que par la rotation elle-même, on comprend que la question qui nous occupe présente une difficulté toute particulière.

Les premiers observateurs reconnurent des inégalités dans le mouvement des taches, et ils les apprécièrent par l'inégale durée de leurs révolutions. D'après les observations de Scheiner, cette durée variait de vingt-cinq à vingt-sept et même vingt-huit jours. Galilée supposa qu'il s'était trompé; mais il ne réussit pas mieux lui-même dans cette détermination; il fixa la révolution du Soleil à un mois lunaire, environ, ce

qui est une évaluation bien grossière, et de plus il ne reconnut pas l'inclinaison de l'équateur solaire sur l'écliptique (1).

Pour éliminer l'influence du mouvement propre, on ne peut employer qu'un seul moyen : déterminer la durée de la rotation solaire, d'après le mouvement d'un très-grand nombre de taches. Car si l'on n'emploie qu'une seule observation, les résultats seront nécessairement entachés d'une erreur égale au mouvement propre lui-même; si l'on calcule la révolution d'après plusieurs observations, mais en petit nombre, les erreurs ne disparaîtront pas à coup sûr; elles ne se compensent parfaitement les unes les autres que dans une longue série. Au siècle dernier, les géomètres se sont beaucoup occupés de déterminer la rotation solaire d'après trois observations d'une même tache; mais leurs solutions, ingénieuses et élégantes au point de vue géométrique, n'ont pu être d'aucune utilité réelle pour résoudre une question aussi complexe. C'est ce

(1) Nous avons souvent cité l'Ouvrage de Scheiner comme faisant autorité. Ce livre a été tellement décrié du vivant de son auteur, que nous croyons devoir enregistrer ici l'appréciation d'un juge bien compétent. Lalande, dans le troisième volume de son *Astronomie*, n° 3227, dit ces mémorables paroles : « Quoi qu'il en puisse être de celui à qui le hasard a fait voir les taches pour la première fois, il est sûr que personne ne les observa aussi bien et n'en donna la théorie d'une manière aussi complète que Scheiner. Son Ouvrage a 774 pages sur cette matière, et cela suffit pour faire voir avec quelle assiduité il s'en occupa, et combien il donna d'étendue à ses recherches. Hévélius le cite avec le plus grand éloge : *Incomparabilis et omnigenæ eruditionis... ut in hac materia omnibus palmam quasi præripuisse dici posset* (*Selenog.*, p. 82). » Il est bien regrettable que nous n'ayons pas réussi à trouver ses manuscrits, que nous avons recherchés à la demande de M. Wolff, de Zurich.

qui a fait dire à Delambre que ce problème était plus curieux qu'utile, et qu'un astronome devait s'en occuper tout au plus une fois dans sa vie, pour voir si cette rotation demeure constante (*Astronomie*, t. III, p. 59). Heureusement son conseil n'a pas été suivi: dans ces derniers temps, des savants habiles ont repris le problème d'une manière plus rationnelle, et ils sont arrivés à un résultat satisfaisant.

Une des difficultés les plus sérieuses résulte des changements de formes qu'éprouvent les taches; leur contour variant d'un jour à l'autre, on n'est jamais sûr de viser toujours le même point dans les observations successives. On évite en grande partie cet inconvénient en étudiant de préférence des taches rondes, régulières et cratériformes; l'expérience prouve qu'elles varient peu, et qu'elles font souvent plusieurs révolutions consécutives; cependant, même avec cette précaution, on n'est jamais exempt de doutes.

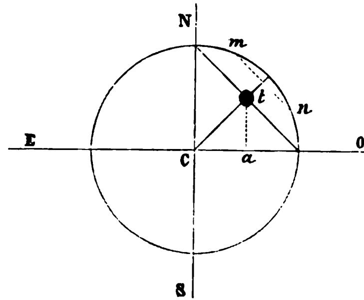
Pour se faire une idée de la précision qu'il conviendrait d'apporter dans ces observations, il suffit de se rappeler qu'un arc d'une seconde, au centre même du disque, correspond à un angle héliocentrique de 5′37″, et que cette valeur augmente à mesure qu'on s'éloigne du centre, à tel point qu'auprès du bord, un arc d'une seconde correspond à 3 degrés environ.

Le meilleur moyen d'observation consiste à mesurer directement la distance de la tache au bord du disque, et en second lieu l'*angle de position*, c'est-à-dire l'angle que forme le rayon du disque passant par le point observé avec le cercle horaire qui passe par le centre du disque même.

Soit C le centre du disque (*fig.* 50), C*t* la direction

de la tache, NCS le cercle horaire tiré par le centre du Soleil ; l'angle de position sera NCt. Lorsqu'on con-

Fig. 50.



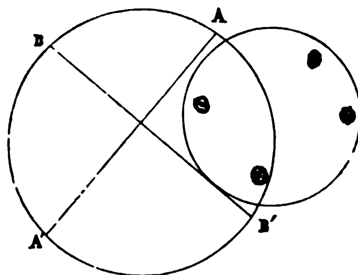
naît cet angle et la distance Ct, on peut calculer la longitude et la latitude héliographiques de la tache, c'est-à-dire fixer sa position absolue, comme on la verrait du centre du Soleil. Cela se fait par des formules connues.

Comme il est impossible de prendre exactement la direction du centre, on dispose le micromètre de manière à ce que l'un de ses fils soit perpendiculaire, l'autre tangent au bord ; il vaut mieux que le second fil empiéte un peu sur le disque, comme on voit en *mn* ; on jugera, par l'égalité des deux segments *m* et *n*, que le réticule est convenablement disposé. On obtient ainsi des résultats excellents ; mais il faut convenir que cette méthode est laborieuse, et qu'elle se prête mal à une longue série d'observations. La méthode des projections est préférable, mais il est nécessaire de faire les corrections que nous avons indiquées dans le Chapitre Ier. On peut les éviter en projetant le fil du réticule, ou, mieux encore, en projetant, comme

font M. Spoerer et M. Heis, un réseau de traits re tangulaires placé au foyer même de l'objectif : de cet manière les déformations sont les mêmes pour l'ima du Soleil et pour celle du réticule.

M. Carrington a employé une autre méthode da une grande série d'observations. Dans le plan foc de l'objectif, il plaça deux fils d'or, ou, mieux, de fils d'araignée AA', BB' (*fig.* 51) rectangulaires ent

Fig. 51.



eux, et inclinés de 45 degrés sur le cercle horai Puis, il projetait ce réticule sur un écran, et observ les instants où le bord du Soleil et les taches v naient successivement traverser les projections d fils. Ces observations faites, il pouvait calculer fa lement la distance au centre du disque et l'angle position. Cependant, lorsque les taches sont près bord, cette méthode est difficile à employer, et e ne donne pas des résultats très-précis.

Dans une série d'observations très-délicates dc nous parlerons bientôt, nous avons employé simp ment la méthode micrométrique; mais nous avo trouvé que les dessins exécutés sur les projectio lorsqu'on leur fait subir les corrections convenabl

fournissent des données bien *suffisantes* pour les calculs ordinaires, et on peut parfaitement les employer pour la plupart des recherches qui restent encore à faire.

Quel que soit le moyen qu'on emploie, il faudra toujours combiner un grand nombre d'observations pour rendre les résultats indépendants des causes d'erreur que nous avons signalées, ce qui constitue un travail très-considérable. M. Carrington, après un examen consciencieux de sa grande série d'observations, qui fut en grande partie calculée et imprimée aux frais du Gouvernement anglais, conclut que, pour faire avancer nos connaissances plus qu'il ne l'a fait dans son Ouvrage, il faudrait une dépense d'au moins 5000 livres sterling (125000 francs). Ce point de vue purement financier pourra paraître convenable à un marchand plutôt qu'à un savant; mais il est certain, et nos lecteurs en seront bientôt convaincus, que, vu le travail et l'assiduité qu'elles exigent, les recherches relatives au Soleil ne sauraient être l'œuvre d'un amateur, ni même d'un savant isolé.

§ II. — *Résultats obtenus relativement à la rotation du Soleil.*

La détermination de la rotation solaire renferme trois éléments : 1° la durée de la révolution; 2° la position des nœuds de l'équateur solaire par rapport à la ligne des équinoxes; 3° l'inclinaison de l'équateur solaire sur le plan de l'écliptique.

Les anciens astronomes déterminaient séparément chacun de ces éléments, en choisissant des observa-

tions faites dans des circonstances convenables. Po
évaluer la durée de la révolution, on mesurait
temps qu'employait une tache à revenir au mên
point du disque, par exemple au centre. Cette m
thode, on le conçoit facilement, n'est applicable q
dans un très-petit nombre de cas. On ne peut pas
contenter d'observer le temps qu'une tache met
passer devant le disque, parce que sa trajectoire e
partagée en parties inégales par le contour apparent c
Soleil, qu'on appelle souvent l'*horizon des taches*.
la suite d'une étude longue et minutieuse, Schein
put évaluer à vingt-sept jours la durée de la révoluti
synodique (c'est ainsi qu'on appelle la révolution a
parente, dans laquelle la tache revient au même poi
du disque par rapport à l'observateur. On en dédu
vingt-cinq jours et un tiers pour la durée de la r
volution sidérale, c'est-à-dire pour le temps emplo
par un point du Soleil à décrire un cercle tout entie

On déterminait la position du nœud en observa
l'époque à laquelle les taches semblent décrire d
lignes droites, l'observateur se trouvant alors dans
plan même dans lequel se meuvent les taches. Schein
trouva pour sa longitude 69 ou 70 degrés.

Enfin, on déduisait l'inclinaison de la grandeur c
petit axe de l'ellipse que décrivent les taches à l'ép
que du maximum de courbure. Scheiner ayant to
jours trouvé ses résultats compris entre 6 et 8 degré
adopta $7°,5$ pour valeur approchée.

Cassini donna des résultats peu différents de ceux
Scheiner, et déduits également d'un grand nomb
d'observations. Ces résultats présentent un grand int
rêt, et nous les rappelons afin de reconnaître l'étend

des variations que ces éléments ont pu subir. Plus tard, on eut l'idée malheureuse de n'employer qu'un petit nombre d'observations, et alors les anomalies se manifestèrent d'une manière très-saillante, comme on peut s'en convaincre par le tableau suivant :

ASTRONOMES.	DURÉE de la rotation en jours solaires moyens.	INCLINAISON de l'équateur solaire sur l'écliptique.	LONGITUDE du nœud ascendant.	ÉPOQUES.
Scheiner.........	25,33	7°30′	de 69° à 70°	1675
Cassini..........	25,58	7.30	70.10′	1678
Lalande.........	25,42	7.20	78	1776
Delambre........	25,01	7.19	80.17	1775
Bianchi..........	25,35	"	"	1839
Laugier..........	25,34	7. 9	75. 8	1840
Petersen.........	"	6.51	73.29	1841
Böhem..........	25,52	6.57	76.47	1833
Kysæus..........	25,09	6.38	76.38	1841
Carrington......	"	7.15	73.40	1850
Spoerer.........	25,234	6.57	74.36	1866

Il y a entre tous ces résultats une discordance frappante. M. Carrington la remarqua, et c'est ce qui le détermina à faire une série continue d'observations d'après la méthode que nous avons indiquée.

Avant d'exposer les résultats auxquels il est parvenu, faisons remarquer qu'on ne constate aucune variation considérable dans la position de l'équateur solaire. Scheiner donnait comme position du nœud ascendant 69 ou 70 degrés, ce qui fait actuellement 72°55′, en tenant compte de la précession des équinoxes. Ce résultat concorde d'une manière suffisante avec celui de M. Carrington, vu le peu de précision des observations anciennes.

Le travail de M. Carrington, commencé en novembre 1853, s'est continué jusqu'en mars 1861. Les données de l'observation ont été discutées par une analyse savante et minutieuse qui lui donnent une très-grande importance. Dans sa discussion, il prenait comme point de départ la valeur présumée la plus exacte des éléments de rotation solaire, et il s'en servait pour calculer d'avance les différentes positions que devait occuper une même tache. Il déterminait ensuite les différences entre les positions calculées et les positions observées, et ces différences servaient à calculer les corrections destinées à rectifier les nombres primitivement adoptés. Les résultats ont été publiés à Londres en 1863, dans un grand Ouvrage enrichi de belles gravures.

M. Spoerer, d'Anclam, a fait également une longue série d'observations, qu'il continue encore, et il est arrivé de son côté à des conclusions semblables à celles de M. Carrington.

Nous avons aussi discuté un certain nombre de nos propres observations; notre série, commencée en 1859, peut faire suite à celle de M. Carrington, et nous la continuons encore.

Enfin, on a les photographies de Kew, qu'on pourra employer avantageusement. Mais toutes ces observations n'ayant pas encore été discutées, nous citerons seulement les résultats de MM. Carrington et Spoerer.

La première loi signalée par ces observateurs est la confirmation d'un fait déjà remarqué par les anciens, c'est que « les taches sont très-rares au delà de 30 degrés de latitude héliocentrique ». Au mois de juin 1846, M. Peters observa à Naples une tache ayant pour coor-

données 134° 20′ de longitude et 50 degrés de latitude nord. Cette tache est la plus éloignée de l'équateur qu'on ait jamais observée. Elle possédait un mouvement propre très-prononcé, mais en sens inverse de la rotation solaire; dans ce mouvement elle parcourait chaque jour — 64 minutes en longitude et + 11 minutes en latitude. On a remarqué aussi que les taches sont rares sur l'équateur, et qu'elles se montrent en plus grande quantité dans deux zones situées symétriquement, au nord et au sud, entre le 10ᵉ et le 30ᵉ degré de latitude.

La seconde loi est plus importante : « La rotation solaire n'a pas la même durée sur tous les parallèles »: *la vitesse est plus grande à l'équateur qu'au pôle*, et par conséquent, c'est sur l'équateur que l'arc parcouru en un jour devient maximum. On a cherché à exprimer d'une manière empirique cette rotation diurne. Nous donnons trois formules qui sont dues, la première à M. Carrington, la seconde à M. Faye, la troisième à M. Spoerer. (ξ représente la rotation diurne et λ la latitude) :

$$\xi = 14°25' - 16' \sin^{\frac{7}{4}} \lambda.$$

$$\xi = 12° - 186' \sin^2 \lambda.$$

$$\xi = 16°,8475 - 3°,3812 (\sin \lambda + 41°13').$$

Il est donc certain que la vitesse angulaire de rotation n'est pas la même sur tous les parallèles. Nous ne connaissons pas la vitesse de rotation près des pôles, et c'est seulement par analogie que nous pouvons généraliser la loi. Au delà du 50ᵉ parallèle, on n'a jamais observé de taches, et par conséquent on ne

peut pas étudier la manière dont s'exécute la rotation de ces points; le seul phénomène qui puisse servir de base à cette étude serait celui des facules; mais elles sont si variables dans leurs formes, qu'on ne peut y avoir aucune confiance.

Pour donner une idée de la manière dont varie la vitesse de rotation suivant les latitudes, nous reproduirons le tableau suivant extrait de l'Ouvrage de M. Carrington, en y ajoutant une dernière colonne extraite du même Ouvrage pour les mouvements en latitude.

LATITUDE des taches.	ROTATION DIURNE en arc.	POIDS, d'après le nombre des observations.	MOUVEMENTS en latitude.
+ 50 N.	787'	1	− 17
35	806	18	+ 14
30	824	59	+ 14
25	831	116	+ 5
20	840	151	− 1
15	851	127	− 5
10	859	142	− 12
5	863	85	+ 10
Équateur.	867	5	− 21
− 5	865	31	+ 4
10	856	218	− 2
15	845	98	+ 14
20	839	200	+ 15
25	827	75	+ 6
30	814	67	− 10
35	805	19	
40	729	2	

La deuxième colonne montre la manière dont varie la rotation. La troisième contient une évaluation numérique de l'importance que l'on peut attacher aux

résultats, vu le nombre des taches qui ont servi à les calculer; c'est ce que nous exprimons par le mot *poids*. Cette colonne met en évidence les zones où se produisent les maxima des taches. Si l'on pouvait s'appuyer sur un nombre aussi limité d'années, on pourrait dire qu'il y a quatre zones de maxima correspondant aux latitudes :

$$+20, \quad +10, \quad -10, \quad -20,$$

auxquels les maxima observés sont

151, 142, 218, 200.

On peut aisément remarquer que ces positions correspondent à peu près à celles où les mouvements en latitude changent de signe. Cette coïncidence est importante, car elle semble indiquer une relation entre les mouvements en latitude et les arcs qui servent de limites aux différentes zones où se produisent les taches.

En troisième lieu, les latitudes des taches sont également variables, mais la loi n'est pas aussi simple que pour les longitudes. La dernière colonne du tableau précédent, extraite d'un tableau plus détaillé de M. Carrington, montre que la loi est un peu confuse, le nombre des observations étant sans doute insuffisant. Cependant ce tableau, quelque imparfait qu'il soit, nous permet de faire les remarques suivantes.

1° De 5 à 20 degrés N., et de 10 à 15 degrés S., le mouvement est négatif, c'est-à-dire dirigé vers l'équateur;

2° De 20 à 35 degrés N., et de 15 à 30 degrés S., le mouvement est dirigé vers les pôles : pour les points plus éloignés, il est impossible d'établir une loi; les

taches sont trop peu nombreuses et les résultats trop discordants pour qu'on puisse en tirer aucune conclusion;

3° Les changements de signe les plus prononcés correspondent à des points voisins de ceux où le nombre des taches passe par un maximum ou par un minimum;

4° En comparant les mouvements en longitude et en latitude, on voit que l'équateur solaire ne divise pas les zones des taches et leurs trajectoires en deux parties égales; la ligne mitoyenne paraît coïncider avec le parallèle de 5 degrés N. : ce fait est important, et nous le rappellerons dans le paragraphe suivant, lorsque nous reconnaîtrons que l'équateur thermique ne coïncide pas non plus avec l'équateur géométrique.

Les lois que nous venons d'exposer résultent de la discussion des moyennes; mais dans les cas particuliers, il y a de très-grandes divergences. Pour les reconnaître, il suffit de faire une série assez longue de mesures, et de calculer les longitudes jour par jour. Pendant l'année 1866, nous avons voulu examiner sérieusement cette question, et nous avons discuté les trajectoires de toutes les taches qui ont paru depuis le 1er janvier jusqu'à la fin de juillet. D'autres occupations nous ont empêché de poursuivre ce travail plus longtemps; mais voici les conclusions auxquelles nous sommes arrivé :

Les éléments déterminés par M. Carrington, comparés avec nos observations, laissent à désirer; ils donnent des différences systématiques qui doivent provenir de leur inexactitude. M. Spoerer a combiné nos observations avec les siennes, et elles lui ont

donné des résultats que nous inscrivons ci-dessous en regard des éléments donnés par M. Carrington; tous les nombres sont ramenés à la même époque, 1869 :

ÉLÉMENTS.	CARRINGTON.	SPOERER.
Nœud	73°57′	74°37′
Inclinaison............	7°15′	6°57′
Rotation diurne........	14° 18′	14°,2664
Durée de la rotation...	25j, 38	25j,2340

Ces deux séries de résultats doivent être regardées comme préférables à toutes celles qu'on a données jusqu'à présent. Leur différence est assez sensible, mais elle ne doit pas être attribuée à des défauts dans les observations. Lorsqu'on les emploie à calculer la position des taches, on trouve toute une série de taches qui diffèrent des positions théoriques par excès, tandis que d'autres en diffèrent par défaut; on en doit conclure que nous sommes en présence de mouvements réels. Mais, pour démêler ceux-ci, il faudra un travail très-long et très-soutenu.

En examinant un grand nombre de taches calculées avec la plus grande rigueur, nous sommes arrivé aux conclusions suivantes, qui se trouvent également vérifiées dans la grande série de M. Carrington, ainsi que nous l'avons reconnu depuis :

1° Toutes les fois qu'une tache se divise, ou qu'elle subit un changement considérable dans sa forme, on observe toujours un mouvement brusque, une espèce de saut qui se fait invariablement vers la partie antérieure, c'est-à-dire dans le sens où croissent les longitudes.

2° Les grandes taches, même lorsqu'elles ont une longue durée, ne sont pas exemptes de ces mouvements brusques, et on remarque de temps en temps des recrudescences d'activité dans la force ou dans le mouvement qui les produit. (Exemple : tache du 14 au 26 mars, du 12 au 23 avril, du 1er au 12 juin, du 28 juin au 9 juillet.)

3° Les taches rondes cratériformes montrent une stabilité plus grande que les taches dont les bords sont déchiquetés, les noyaux multiples et irréguliers; elles font souvent plusieurs rotations.

4° Les taches petites et superficielles ont des mouvements très-irréguliers. Il en est de même des grandes taches, soit à l'époque de leur formation, soit au moment où elles sont sur le point de disparaître.

5° Toutes les fois qu'une tache change de forme, ou qu'il s'en produit une autre dans son voisinage, on remarque une perturbation ou un déplacement.

6° Les grandes taches, après s'être dissoutes, reparaissent souvent à une petite distance de leur position primitive, mais toujours vers la partie antérieure. Ainsi, la tache n° 43, après avoir disparu, se reproduisit une trentaine de degrés plus loin, sous la même latitude.

Pour donner au lecteur une idée de ces mouvements, nous apporterons ici quelques exemples de taches qui ont duré plusieurs rotations, et qui ont été calculées sur des mesures micrométriques faites au grand équatorial du Collége Romain, d'après le système de formules de M. Carrington.

Ces phénomènes montrent qu'il est impossible de ne pas reconnaître aux taches des mouvements propres de transport sur la surface du Soleil.

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD. Côté intérieur.	DISTANCE AU BORD. Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ	LONGITUDE hélio-graphique A.	NOTES.
Tache n° 32; du 8 au 17 mai 1866. 1er noyau.								
Mai 8	127,9097	69° 6′	455″,70	″	31°.17′.43″	— 3°.48′,3	107,24	Irrégulière.
10	129,8819	83.28	698,16	″	15.23.26	7. 9,0	97,73	″
11	130,8923	146. 9	895,53	″	3.22. 4	6.16,3	98,457	Divisée en 2.
12 S.	132,0833	235.34	648,89	″	18.27.17	6.43,9	101,911	″
13	132,8888	240.48	484,20	″	29.16.39	6. 7,9	101,637	″
15	135,1891	243.48	111,239	134,303	60.21.48	5.24,6*	102,979	″
16	135,9851	243.15	49,87	″	71. 6.34	6.28,9	103,235	Diam. 20° 59′.
17 S.	137,0694	242.54	1,064	″	87. 1.36	6.47,9	104,725	″
La même. 2e noyau.								
Mai 10	129,8819	77° 5′	598″,87	″	21°.41′.31″	— 6°.22′,2	91,14	″
11	130,8923	87.15	805,06	″	8.49.22	5.51,3	90,882	″
12 S.	132,0833	218.30	816,57	″	8. 6.54	6.50,2	90,581	″
13	132,0833	235. 6	643,30	″	18.48.19	6.52,6	91,253*	Traînée de petites taches.

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD Côté intérieur.	DISTANCE AU BORD Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique Λ.	DIAMÈTRE apparent héliographique.
Tache n° 38. Deuxième rotation de la précédente; du 1er au 12 juin.								
Juin 1	151,9336	79°.52′.48″	32″,231	46″,808	73°.12′.55″	— 5°.13′,6	107,673	3°. 5′
2	152,9012	81.16.30	114,378	134,319	59.59. 5	5.41,7	108,193	2.41
3	153,8905	81.46.48	227,828	256,008	47.57.30	4.59,1	107,171	2.32
4	154,8681	84.15.36	402,200	433,433	33.51.20	4.53,9*	108,461	2.16
5	155,8876	90.31.12	602,202	632,889	20.17.43	5. 5,8	108,243	1.59
8	158,9048	240.39. 0	595,293	628,777	20.38.27	5.29,9	108,386	2. 9
9	159,8463	248.28.12	416,176	441,078	33. 3.18	4.38,4	108,834	1.47
10	160,9174	250. 0. 6	232,435	250,690	47.55. 5	4.49,8	109,726	1.39
11	161,9004	252.48.12	110,899	124,487	61. 6.32	4.40,9	109,870	1.42
12	162,9033	253.54. 0	26,882	39,249	74.37.35	4.39,6	110,135	0.52
Tache n° 39; du 23 au 26 juin.								
Juin 23	173,8603	243°. 4′.12″	408″,452	″	34°.28′.51″	— 8°. 0′,3	283,694	″
24	174,8943	249.40 48	231,271	″	48.52.30	8. 9,9	284,828	″
25	175,8751	252.28.12	99,675	114,240	61.19.16	7.35,1	285,600	Irrégulière.
26	176,8800	255. 7.48	22,305	30,652	75. 7.15	7.26,4	286,416	″

N° 40. Troisième rotation de la 32me; du 28 juin au 9 juillet.

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD Côté intérieur.	DISTANCE AU BORD Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique A.	DIAMÈTRE héliographique.
Juin 28	178,8717	92°.10'.12"	29",447	37",996	74°.25'.31"	— 3°.12',2	110,247	1°.56'.19"
29	179,9227	94. 9.26	111,486	123,345	60.55.41	5.29,9	109,913	1.39. 7
30	180,9003	96.58.48	233,485	245,712	48. 6.51	5.31,0	110,019	1. 6.35
Juillet 1	181,9240	101.58.48	397,071	416,333	34.36.33	5.39,9	*110,351	1.24.54
2	182,8973	110.12.12	572,945	593,282	22.27.27	5.27,4	110,134	1.19.44
4	184,8958	213.18. 8	767,38	789,88	10. 8.41	5. 1,6	111,086	1.22.44
5	185,8517	245.49.48	604,590	617,747	20.38.11	4 37,3	110,857	0.50.54
6	186,8632	255.48.48	420,562	431,110	33.13.18	4.31,9	110,781	0.56.53
7	187,8667	260.48. 0	256,212	268,035	46. 6.28	4. 8,2	110,724	1. 2. 0
8	188,9280	263.42.12	120,607	128,374	60. 3.18	4. 3,8	110,792	0.57.24
9 S.	189,8462	665.16.12	41,691	45,205	72.21. 4	4.16,4	111,006	0.43.53
9 M.	190,2472	266.15. 0	28,998	23,619	77.34.39	3.57,5	110,980	1.19.75

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD Côté intérieur.	Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique Λ.	DIAMÈTRE héliographique.
N° 43. Deuxième rotation de la précédente, n° 39; du 28 juin au 9 juillet.								
Juillet 11	191,8981	99°.42′. 0″	9″,862	5″,569	82°13′.19″	— 7°. 6′,8	290,265	1°.31′,5
12	192,8906	101.24. 0	60,705	52,605	69.48.34	7.17,5	289,748	1.23
13	193,8748	104. 5. 1	155,574	141,059	57.16 19	7. 7,2	289,489	1.38
14	194,8494	108.18. 4	285,791	266,186	44.55.12	7.24,8	289,418	1.40,5
15	195,9250	115.48. 0	470,556	448,836	30.48.56	7.11,8	290,015	1.31,5
16	196,8930	128.39. 6	639,422	613,740	19.39.51	6.37,51	289,625	1.39
17	197,8924	172.23. 0	750,594	777*,789	11 3.33	6.10,8	290,203	1.41,5
18	198,8854	229.30. 0	717,255	686,173	14.55.22	5.56,9	289,868	1.56*
19	199,8850	251 25. 2	545,553	521,387	25.45.53	5.48,3	289,704	1.37
20	200,8790	259.31. 8	372,890	351,785	37 57.31	6. 1,6	289,460	1.38
21	201,8651	264.44. 2	221,435	205,119	59.34.54	5.43,2	289,509	1.33,5
22	202,8876	267. 6. 0	101,922	90,241	63.44.22	6.22,3	289,308	1.36,5
23 M.	203,8956	269.55. 2	26,510	21,759	76.56.21	5.54,4	289,411	1.34,5
23 S.	204,1935	270. 9. 6	14,035	10,217	80.35.21	6.12,4	289,126	1.27

Un simple coup d'œil jeté sur les tableaux précédents nous permettra de faire quelques remarques intéressantes.

La tache n° 32 parut le 8 mai; ses coordonnées étaient 3°48′ de latitude, 107°,24 de longitude. Au bout de deux jours, elle était divisée en deux parties ayant pour coordonnées, l'une 7°9′ de latitude et 97°,73 de longitude, l'autre 6°22′ de latitude et 91°,14 de longitude. La longitude du premier noyau va en augmentant, tandis qu'elle reste stationnaire pour le second; quant aux latitudes, on ne reconnaît pas de mouvement régulier.

Cette tache reparaît le 1er juin (n° 36); le second noyau a disparu, il ne reste que le premier. La latitude va en diminuant progressivement, pendant que la longitude augmente. Au 1er juin, le diamètre était de 3°5′; le 9, il est réduit à 1°39′. Le 4 juin, il y a évidemment un saut brusque de 1 degré et une grande diminution dans l'étendue.

Nous avons inscrit sous le n° 40 la troisième rotation de la même tache (32 et 36). Nous y trouvons une latitude oscillante, tandis que la longitude va toujours en croissant. Le diamètre décroît jusqu'au 5 juillet, puis il augmente de nouveau en faisant des mouvements brusques qui annoncent sa dissolution prochaine. En effet, cette tache n'a plus reparu.

Sous les nos 39 et 43 se trouvent deux rotations d'une autre tache. Du 25 au 26 juin sa latitude diminue, tandis que sa longitude va en croissant. Pendant sa seconde rotation, elle possède un mouvement en latitude très prononcé, tandis que sa longitude est très-stable et son diamètre constant.

Nous pourrions multiplier les exemples, mais cet essai suffira pour montrer au lecteur quelles sont les difficultés que présente la théorie de ces mouvements. Pendant qu'une tache présente les éléments de la rotation solaire, l'autre ne les présente plus, et la correction définitive ne peut ressortir que d'un travail très-long et très-pénible.

§ III. — *Théories proposées pour expliquer le mouvement des taches.*

Les résultats que nous venons d'exposer prouvent que nos observations n'atteignent pas la partie solide du Soleil, mais seulement son atmosphère fluide. En effet, lorsqu'un corps solide est animé d'un mouvement de rotation, il est évident que tous ses points doivent posséder la même vitesse angulaire, et que, par conséquent, ils doivent tous mettre le même temps à exécuter une rotation complète. Nous avions donc raison de dire, en nous appuyant sur les changements de forme et les mouvements qu'on observe dans l'intérieur des taches, que la couche photosphérique dans laquelle se passent tous ces phénomènes est mobile comme les nuages qui flottent dans notre atmosphère.

Maintenant une nouvelle question se présente. La fluidité est-elle propre à la couche photosphérique, ou bien s'étend-elle au corps solaire tout entier? En d'autres termes, existe-t-il dans l'intérieur du Soleil un noyau solide? Ce noyau n'est-il pas le siége d'actions physiques, dont les taches ne seraient que les manifestations? On a pendant longtemps admis cette hypo-

thèse, mais différentes considérations nous ont depuis longtemps convaincu qu'elle est insoutenable, car elle est incompatible avec la température élevée que possède le Soleil, comme nous le verrons bientôt. Dès le mois de janvier 1864, nous annoncions que le Soleil pourrait bien être gazeux (1). Nous étions conduit à cette hypothèse par la loi de Carrington sur les rotations, et par ce fait que les taches possèdent un mouvement qui est plus rapide dans la période de leur formation.

Remarquons d'abord que cette hypothèse d'un Soleil complétement gazeux est loin d'être en contradiction avec les idées généralement admises sur la formation des corps célestes. Le Soleil a dû passer d'abord par l'état de nébuleuse; depuis lors il s'est condensé par le refroidissement; mais rien ne nous prouve que sa température se soit abaissée au point de solidifier sa masse intérieure. Nous devons donc aborder le problème de sa constitution physique, libres de toute idée préconçue et de toute hypothèse à cet égard.

Les savants qui admettent l'existence d'un noyau solide à l'intérieur de la photosphère, comparent le mouvement des taches solaires à celui de nos vents alizés. Les marins et les météorologistes savent parfaitement qu'il existe, dans la zone torride, des courants atmosphériques soufflant constamment du N.-E. dans l'hémisphère nord, et du S.-E. dans l'hémisphère sud. Ces courants résultent du mouvement de rotation de la Terre combiné avec la force d'appel qu'exerce

(1) Voir *Bulletin météorologique de l'Observatoire du Collége Romain*, 1er janvier 1864, p. 4, col. 1, lig. 34.

la chaleur du Soleil en échauffant l'air des régions équatoriales, et en déterminant un mouvement de bas en haut. Un vide tendant ainsi à se former dans la zone torride, l'air des régions voisines se précipite pour le remplir. Dans ce mouvement, l'air passe d'un parallèle de rayon plus petit à un parallèle de rayon plus grand; de là une différence de vitesse qui produit l'effet d'un vent soufflant de l'Est; enfin ce courant se combinant avec le mouvement de translation de l'air même des pôles vers l'équateur, il en résulte des vents composés et inclinés par rapport à l'équateur comme nous l'avons indiqué plus haut.

Ces courants inférieurs sont accompagnés de courants supérieurs d'une élévation de 2000 à 3000 mètres, soufflant du S.-O. dans notre hémisphère, et du N.-O. dans l'hémisphère sud. De plus, au delà du 30e degré de latitude il existe des zones de calmes dans lesquelles l'air descend, se divise en deux parties, dont l'une se dirige de nouveau vers l'équateur, tandis que l'autre va en sens contraire et sert à alimenter les courants polaires.

Telle est en peu de mots la nature de cette grande circulation terrestre qu'on a cru reconnaître également dans l'atmosphère solaire. Cette théorie n'a rien d'impossible en elle-même. On pourrait bien objecter que le Soleil n'est pas, comme la Terre, soumis à l'action d'une force extérieure capable de déterminer ces mouvements, en échauffant de préférence les régions équatoriales. Mais il n'est pas impossible que le même effet soit produit par une cause tout intérieure, et de fait nous verrons que la température est plus élevée à l'équateur qu'aux pôles.

Au lieu de chercher s'il existe des causes capables de produire dans le Soleil une circulation analogue à celle des vents alizés, suivons une méthode plus positive, et voyons si les faits se prêtent à ce mode d'interprétation. Dans ce mouvement atmosphérique, les taches se trouveraient ou dans le courant inférieur ou dans le courant supérieur. Dans la première hypothèse, partant d'un parallèle où la vitesse est moins considérable, elles arriveraient à l'équateur avec un mouvement relatif dirigé en sens contraire de la rotation générale; dans la seconde, partant de l'équateur, où la vitesse est *maxima*, elles arriveraient dans des régions où leur mouvement relatif serait dirigé dans le sens même de la rotation; dans les deux cas, leur vitesse angulaire serait plus faible à l'équateur, plus considérable sur les parallèles. Cette conclusion inévitable de la théorie des alizés est absolument contraire à la loi parfaitement certaine et constatée par l'observation du mouvement des taches en longitude; c'est à l'équateur qu'elles possèdent la plus grande vitesse.

Les mouvements des taches en latitude (p. 90) ont mis en évidence des lignes nodales et des changements de signes qui indiquent un transport des taches vers l'équateur solaire, entre les latitudes 25 degrés N. et 20 degrés S. Au delà de ces limites, le mouvement devient divergent, et les taches se dirigent vers les pôles. Ces mouvements sont, en réalité, comparables à ceux qu'on observe dans les alizés terrestres, et nous devons en conclure qu'il existe dans le Soleil des courants qui transportent la photosphère. Mais comme la composante qui agit suivant la longitude

est dirigée en sens contraire de la composante analogue dans les alizés terrestres, il est impossible d'admettre complétement la même théorie, il faut en chercher une autre qui s'accorde mieux avec les faits.

Supposons que le Soleil soit gazeux dans toute sa masse, et que sa rotation soit moins rapide à la surface que dans les couches plus voisines du centre. Ces deux hypothèses n'ont rien d'inadmissible; elles doivent même se réaliser dans une masse nébuleuse qui se condense, et c'est ce qui est arrivé dans la formation des planètes intérieures qui possèdent une vitesse plus grande que celle des planètes extérieures. Supposons alors qu'une masse de matière, partant de l'intérieur du Soleil, soit amenée par une cause quelconque vers la surface; elle y arrivera avec son excès de vitesse, et possédera par conséquent un mouvement relatif dirigé dans le sens où croissent les longitudes; elle semblera donc lancée en avant, ce qui a réellement lieu pour les taches qui sont en voie de formation. Le milieu dans lequel cette masse sera ainsi parvenue lui opposant une résistance considérable, son mouvement se ralentira, jusqu'à ce qu'il se soit établi un équilibre relatif, c'est-à-dire jusqu'à ce que la tache possède la même vitesse que le milieu qui l'entoure. Ainsi se trouverait encore expliqué le saut en avant qu'on remarque, non-seulement dans la période de formation, mais encore aux époques de recrudescence où de nouvelles éruptions viennent modifier la forme des taches.

Nous ne prétendons pas assigner les causes qui produisent ce mouvement de bas en haut dans la masse gazeuse du Soleil; il en est une, cependant, dont

l'action, facile à prévoir, doit être prédominante dans la production de ces phénomènes. La photosphère, en se refroidissant par la radiation, devient de plus en plus dense; elle doit donc, pour obéir aux lois de l'équilibre, descendre dans l'intérieur et tomber vers le centre. Dans ce mouvement, elle déplace une masse gazeuse plus légère, qui s'élève d'après les lois de l'hydrostatique, et qui, animée d'une vitesse plus grande, doit produire la circulation que nous indique l'observation.

Dans les zones éloignées de l'équateur, le phénomène se complique par les nombreux courants qui doivent exister dans une masse si considérable; aussi est-il impossible d'en expliquer le mécanisme d'une manière plus précise sans faire des hypothèses complétement arbitraires, par exemple sur la profondeur des couches d'où partent les masses qui produisent les taches; sur le refroidissement qu'elles subissent à la surface, etc. C'est pour cela que, dans le Soleil, ces phénomènes ne peuvent pas présenter le même degré de simplicité que sur la Terre, où les causes se réduisent à deux : l'élévation de température produite par le Soleil; la forme et la distribution des continents et des mers. Et cependant, même sur la Terre, ils sont tellement compliqués, que les météorologistes sont loin d'être d'accord sur le théorie et sur l'explication précise de ces mouvements.

On a objecté que le Soleil ne saurait être gazeux sans être transparent, et que, s'il est transparent, l'existence des taches devient impossible. Dans notre théorie, les taches sont des cavités qui se sont formées dans les nuages de la photosphère. Elles sont

remplies de gaz absorbants, d'où il suit que nous ne devons pas apercevoir la couche photosphérique qui se trouve de l'autre côté.

De plus, nous pouvons ajouter que :

1° Il est faux que les taches soient absolument noires. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer une tache avec une planète, Mercure par exemple, au moment de son passage sur le Soleil; on verra que la différence est extrêmement grande.

2° Cette prétendue transparence des gaz, lorsqu'il s'agit de masses aussi considérables, est une supposition complétement gratuite. L'atmosphère terrestre, même au zénith, absorbe environ le tiers de la lumière solaire.

3° L'atmosphère du Soleil, sur les bords du disque, absorbe au moins la moitié des rayons émis par la photosphère; il est donc bien naturel de penser que, sous une épaisseur égale au diamètre du globe solaire, l'absorption serait infiniment plus considérable.

M. Faye a adopté, après nous, cette idée que le Soleil est complétement gazeux; il est même communément regardé en France comme l'auteur de cette théorie, car il l'a développée dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*. Mais il n'a pas fait l'hypothèse de la rotation plus rapide à l'intérieur, hypothèse que nous croyons nécessaire pour expliquer les mouvements systématiques des taches, puisque ces mouvements ne peuvent être produits par une circulation analogue à celle des vents alizés.

§ IV. — *De quelques mouvements apparents dus à la profondeur des taches et à la réfraction de l'atmosphère solaire.*

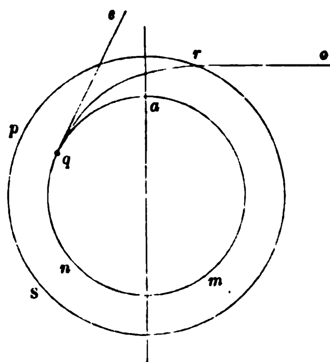
Lorsque l'on étudie les mouvements en longitude d'une tache, on trouve, comme nous l'avons dit, des variations très-considérables et qui paraissent tout à fait anormales. Mais en dehors de ces mouvements irréguliers, on constate, auprès des bords, des aberrations systématiques dont on peut saisir les lois. Près du bord oriental, la tache paraît se rapprocher du centre : sa longitude augmente, et, près du bord occidental, elle paraît marcher en sens contraire et s'approcher encore du centre pendant que sa longitude diminue. Ainsi donc, d'un côté du centre, les arcs diurnes se trouvent augmentés, tandis qu'ils sont diminués de l'autre.

Après avoir remarqué ce fait en examinant les tableaux de M. Carrington, nous en cherchâmes la cause, et nous fûmes porté à l'attribuer aux réfractions de l'atmosphère solaire. Déjà M. Carrington avait indiqué cette source d'irrégularité, mais il ne l'avait pas étudiée avec le soin qu'elle mérite.

Soit *amn* (*fig.* 52) le disque solaire; *rp*S la couche atmosphérique dont il est couvert. Si cette couche possède un pouvoir réfringent assez considérable, un rayon émané du point *q*, au lieu de suivre la direction *qe* suivant laquelle il se propagerait dans le vide, sera dévié suivant une courbe telle que *qro*, tangente à la droite *qe*. Ce rayon ainsi dévié pourra parvenir à l'œil d'un observateur placé en *o*, pour lequel le point *q* fût resté invisible sans la réfraction. Un point

quelconque deviendra donc visible pour nous un peu avant de franchir le cercle qui forme le contour géo-

Fig. 52.



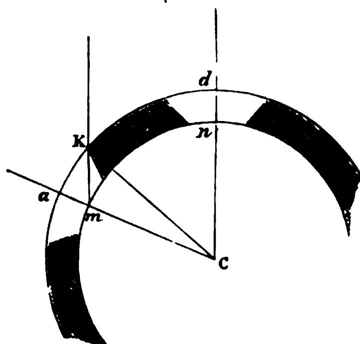
métrique du Soleil, et qui, sans la réfraction, séparerait la partie visible de la partie invisible; les taches seront donc visibles un peu trop tôt d'un côté du disque, tandis que de l'autre elles disparaîtront un peu plus tard. On pourra, pour le calcul relatif à ces phénomènes, employer les formules qui servent à évaluer l'influence de nos réfractions atmosphériques sur le lever et le coucher des astres.

Pendant que nous examinions l'influence des réfractions dues à l'atmosphère, M. Faye donnait une autre explication des irrégularités systématiques qui se produisent près des bords du disque. D'après lui, ces anomalies seraient produites par un phénomène qu'il a appelé la *parallaxe de profondeur*, et qui résulte en effet de ce que les taches sont des cavités.

Supposons (*fig.* 53) une tache ayant la forme d'une cavité conique. L'observateur vise le centre *n* du noyau, et dans ses évaluations il le rapporte au point *d* où son rayon visuel rencontre la surface de la photo-

sphère. Si la tache occupe le milieu du disque, le rayon visuel *dn* passant par le centre C du Soleil, le

Fig. 53.



point visé se projettera au centre même de la pénombre. Mais si la tache se trouve auprès du bord, le point *m* visé par l'observateur suivant la direction K*m*, au lieu d'être rapporté à l'extrémité *a* du rayon solaire C*ma*, paraîtra projeté au point K où le rayon visuel rencontre la photosphère; la tache paraîtra donc s'être rapprochée du centre de la quantité *a*K. Quand on cherche à calculer l'influence de cette parallaxe, on trouve qu'elle produit une erreur proportionnelle à la tangente de la distance héliocentrique, et exprimée par la même formule trigonométrique qui sert pour les réfractions. Il devenait donc impossible de déterminer directement la part qui revient à chacune de ces deux causes dans les productions des mouvements apparents qui nous occupent. Le doute était d'autant plus permis que les calculs faits par M. Faye, en partant de son hypothèse, attribuaient aux taches une profondeur bien plus considérable que celle qui résulte des mesures directes.

L'observation pouvait seule résoudre la question en fournissant des données nouvelles. Pour cela, il fallait chercher à se soustraire à l'une des deux causes d'erreur, afin de pouvoir évaluer l'influence de l'autre. Il était évidemment impossible d'éviter la réfraction; mais je pensai qu'il serait possible d'éliminer la parallaxe de profondeur en prenant la position des deux bords de la tache, et en calculant séparément leurs coordonnées héliographiques. J'eus le bonheur, en 1866, de rencontrer quelques taches très-régulières et ayant un faible mouvement en longitude, surtout celle du 28 juin au 9 juillet, et celle du 11 au 23 juillet. Je les suivis jour par jour avec beaucoup de soin, prenant des mesures micrométriques avec le grand réfracteur, et j'obtins ainsi les résultats inscrits dans des tableaux dont sont extraits ceux du paragraphe précédent.

Après avoir ainsi évité les erreurs dues à la parallaxe de profondeur, on trouve encore une perturbation dans la marche en longitude, et ces perturbations, qui sont toutes dans le sens indiqué par la théorie, ne peuvent être attribuées qu'à la réfraction. Cependant leur valeur ne dépasse pas de beaucoup la limite des erreurs d'observation. Nous sommes convaincu que la réfraction solaire existe, mais nous ne pourrons l'évaluer qu'après avoir fait de nombreuses observations sur des taches d'une régularité et d'une stabilité extraordinaires (1).

Ce sont ces mesures, prises avec le plus grand soin,

---

(1) *Voir* les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1866, t. LXIII, p. 163-170.

qui nous ont appris que les taches subissent souvent de très-grands changements dans leurs dimensions réelles, et que tout changement de forme un peu considérable entraîne une irrégularité dans la marche en longitude.

La théorie de M. Faye, sur la parallaxe de profondeur, se trouve ainsi parfaitement vérifiée, et à son tour elle sert de confirmation aux idées de Wilson. Les taches sont donc des cavités. Mais ces cavités sont-elles produites par des éruptions volcaniques, ou bien sont-elles dues à des tourbillons analogues à nos cyclones? Nous traiterons cette question lorsque nous aurons recueilli toutes les données nécessaires pour la résoudre. Une circonstance nous porterait dès à présent à adopter l'assimilation avec les cyclones : c'est que le maximum des taches coïncide avec les limites des zones où se produit le renversement du mouvement en latitude.

§ V. — *Résumé des mouvements des taches.*

On voit, par tout ce que nous avons dit jusqu'ici, qu'au lieu d'observer le mouvement de rotation du corps solaire lui-même, nous en sommes réduit à étudier celui de son atmosphère. Nous sommes donc dans les conditions où se trouverait un astronome qui voudrait, en se plaçant dans la Lune, déterminer le mouvement de rotation de la Terre, en prenant un nuage pour point de repère. Il lui faudrait d'abord étudier la circulation atmosphérique et en déterminer les lois : tâche bien difficile, et à peu près impossible dans de pareilles circonstances.

Les connaissances que nous avons acquises nous permettent cependant de diviser les mouvements des taches en trois catégories.

La première comprend tous les mouvements généraux; et à ce point de vue, le résultat le plus important est l'inégalité des rotations sur les divers parallèles; la vitesse angulaire est maximum à l'équateur, et elle diminue lorsque la latitude augmente.

La deuxième catégorie comprend les mouvements apparents dus à la parallaxe de profondeur et à la réfraction. La première de ces deux causes étant éliminée par la méthode d'observation que nous avons proposée, il reste seulement la seconde dont l'influence n'a pas encore été suffisamment déterminée, mais qui n'est pas à négliger.

La troisième contient tous les mouvements irréguliers et extraordinaires qui dépendent des causes mêmes qui produisent les taches, causes encore bien obscures et qui resteront longtemps inconnues.

Nous avons fait remarquer plusieurs fois que ces mouvements se produisent surtout au moment de l'apparition d'une tache; il se forme souvent plusieurs centres sans qu'on puisse prévoir lequel d'entre eux persévérera et formera définitivement le noyau de la tache. Les mêmes irrégularités se renouvellent à l'époque de la dissolution finale. Aussi les taches les plus stables sont celles qui paraissent les plus profondes.

Enfin, il est impossible d'expliquer les mouvements systématiques des taches par des courants analogues à nos vents alizés. Cette hypothèse n'explique pas le fait fondamental du transport des taches vers l'équa-

teur avec accélération du mouvement angulaire. Pour expliquer ce phénomène, il faut nécessairement admettre que le Soleil est gazeux dans toute sa masse, et que la vitesse de ses différentes couches va en croissant de la surface au centre. Du reste, nous verrons bientôt d'autres phénomènes qui nous confirmeront dans cette opinion.

§ VI. — *Variations séculaires des taches.*

On peut se demander si les apparitions des taches sont elles-même assujetties à quelque loi générale. Cette question est une de celles qui ont beaucoup occupé les astronomes modernes. Les plus anciens observateurs ont remarqué qu'il n'y a pas chaque année un égal nombre de taches. Il y a eu des époques où il s'est écoulé des mois et des années sans qu'on puisse en observer aucune. Même en admettant que cette dernière affirmation soit un peu exagérée, et qu'elle résulte du peu de précision avec lequel les observations ont été faites autrefois, il n'en est pas moins vrai que le nombre des taches est extrêmement variable.

W. Herschel est le premier qui se soit occupé de cette question. Il chercha à établir un rapport entre les variations des taches et la météorologie terrestre, et, à défaut d'autre élément, il compara le nombre annuel des taches avec le prix du blé. Mais, on le comprend, il ne pouvait rien résulter d'un semblable travail. Sans doute les phénomènes météorologiques du globe doivent dépendre dans une certaine mesure des vicissitudes solaires, nous en verrons

une preuve frappante, mais le terme de comparaison choisi par Herschel n'a aucune relation directe avec l'état du Soleil.

C'est le baron Schwabe, de Dessau, qui a fait le premier travail sérieux sur la question qui nous occupe. Dès 1826, il entreprit de faire la statistique des taches solaires, et depuis lors, jusqu'en 1868, il n'a pas manqué d'observer le Soleil chaque jour, lorsque l'état du ciel le permettait. En examinant cette longue série d'observations, il reconnut une périodicité très-évidente : des maxima et des minima très-prononcés se succédaient à un intervalle de dix ans environ. Sans doute, dans une pareille classification, il y a des éléments un peu défectueux. D'abord, on ne peut pas observer le Soleil tous les jours, et les lacunes qui résultent du mauvais état du ciel viennent nécessairement augmenter le nombre des jours où il n'y a point de taches. De plus, le nombre des taches est toujours un peu arbitraire; il y a souvent des groupes qui, par leurs subdivisions, se prêtent à différentes manières de compter. Mais dans une masse d'observations aussi considérable que celle du baron Schwabe, ces différences se compensent l'une l'autre et disparaissent dans le résultat final. En effet, la loi est si saillante, qu'il suffit de jeter un coup d'œil sur son tableau pour reconnaître qu'aucune objection ne saurait l'ébranler. Ce tableau étant très-intéressant, nous le reproduisons ici en y ajoutant le résultat des observations faites au Collége Romain pendant les dix dernières années.

Tableau du nombre des taches pendant quarante-deux ans.

ANNÉES.	JOURS d'observations.	JOURS sans taches.	NOMBRE des taches.	COLLÉGE ROMAIN.
1826	277	22	118	
1827	273	2	161	
1828	282	0	225	
1829	244	0	199	
1830	217	1	190	
1831	239	3	149	
1832	270	49	84	
1833	267	139	33	
1834	273	120	51	
1835	244	18	173	
1836	200	0	272	
1837	168	0	333	
1838	202	0	282	
1839	205	0	162	
1840	263	3	152	
1841	283	15	102	
1842	307	64	68	
1843	312	149	34	
1844	321	111	52	
1845	332	29	114	
1846	314	1	157	
1847	276	0	257	
1848	278	0	330	
1849	285	0	238	
1850	308	2	186	
1851	308	0	141	
1852	337	2	125	
1853	299	4	91	
1854	334	65	67	
1855	313	146	28	
1856	321	193	34	
1857	324	52	98	
1858	335	0	202	
1859	343	0	205	257
1860	332	0	211	251
1861	322	0	204	251
1862	317	3	160	168
1863	330	2	124	165
1864	325	4	130	97
1865	307	26	93	86
1866	349	76	45	81
1867	312	195	25	72
1868	301	12	101	92

Ce tableau est assez significatif, et on peut y remarquer deux choses : 1° la période est à peu près décennale; 2° chaque maximum est plus rapproché du minimum suivant que du précédent.

Pour déterminer cette période avec plus de précision, plusieurs astronomes ont eu recours aux anciennes observations. M. Wolff, de Zurich, dans son ouvrage sur les taches solaires (*Mittheilungen der Sonnenflecken*) a fait sur ce sujet un travail intéressant. Il a pu établir la chronologie des phases que notre Soleil a présentées depuis l'époque de la découverte des taches jusqu'à nos jours. Ses calculs l'ont conduit à une période de 10 ans $\frac{1}{9}$. M. Lamont a trouvé de son côté $10^{ans},43$.

Nous tirons d'un Mémoire important de M. Fritz la série des maxima et des minima observés et recueillis par différents observateurs. Nous ajoutons à chacune de ces dates un nombre faisant connaître avec quelle approximation les différentes époques sont connues. On peut remarquer que l'incertitude est beaucoup plus grande dans les observations anciennes que dans les plus récentes.

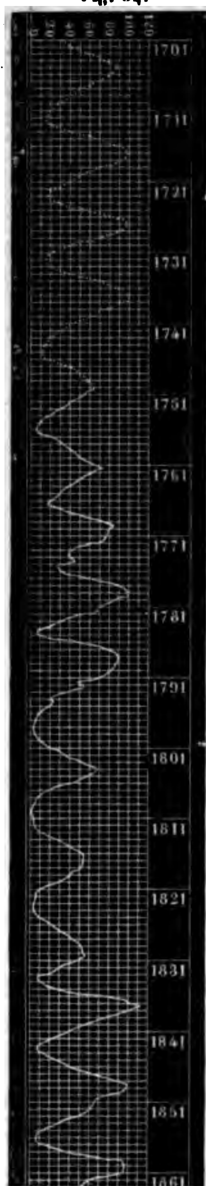
Tableau des époques des maxima et minima des taches solaires, par M. **Fritz**.

MAXIMA.		MINIMA.	
SÉRIE ANCIENNE.			
		1610,8	± 0,4
1615,0	± 1,5	1619,0	± 1,5
1626,0	± 1,0	1634,0	± 1,0
1639,5	± 1,0	1645,0	± 1,0
1655,0	± 2,0	1666,0	± 2,0
1675,0	± 2,0	1679,5	± 2,0
1685,5	± 1,5	1689,5	± 2,0
1693,0	± 2,0	1698,0	± 2,0
1705,0	± 2,0	1712,0	± 1,0
1717,5	± 1,0	1723,0	± 1,0
1727,5	± 1,0	1733,0	± 1,5
1738,5	± 1,5	1745,0	± 1,0
SÉRIE MODERNE.			
1750,0	± 1,0	1755,7	± 0,5
1761,5	± 0,5	1766,5	± 0,5
1770,0	± 0,5	1775,8	± 0,5
1779,5	± 0,5	1784,8	± 0,5
1788,5	± 0,5	1798,5	± 0,5
1804,0	± 0,1	1810,5	± 0,5
1816,8	± 0,5	1823,2	± 0,2
1829,5	± 0,5	1833,8	± 0,2
1837,2	± 0,5	1844,0	± 0,2
1848,6	± 0,5	1856,2	± 0,2
1860,2	± 0,2	1867,1	± 0,1

Afin de mettre cette loi en évidence dans tous ses détails, nous reproduisons la courbe construite par M. Fritz pour résumer la marche des variations annuelles. M. Carrington a construit une courbe tout à fait semblable. Les abscisses représentent les années et les ordonnées le nombre des taches observées.

L'étude de cette courbe montre deux choses : 1° la période est bien décennale, comme nous l'avions an

Fig. 54.



noncé; 2° cependant elle n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire au premier abord : en réalité, il y a deux périodes superposées, l'une semi-séculaire, l'autre décennale; nous n'avons pas d'observations anciennes assez précises pour reconnaître la loi de la variation séculaire, nous ne pouvons que constater son existence.

Les passages des maxima aux minima sont accompagnés d'une circonstance assez curieuse. En disposant les taches d'après leur longitude et leur latitude, sur un diagramme très-serré, M. Carrington a montré que leur latitude va en décroissant à mesure qu'on approche du minimum; puis, lorsque leur nombre va en croissant, elles se montrent à une latitude plus élevée. Cette loi se vérifie encore dans la dernière période, à partir du dernier minimum qui s'est produit en 1867, comme il résulte des observations de M. Spoerer et des nôtres.

En présence de ces variations étonnantes, et dont l'importance n'échappera à personne, nous sommes, comme toujours, porté à nous demander quelle est la loi

qui les régit. L'histoire nous a conservé le souvenir de plusieurs époques où l'intensité lumineuse du Soleil fut considérablement diminuée. Virgile, écho d'une tradition qu'on retrouve dans l'histoire, nous rapporte que le Soleil s'obscurcit à la mort de César,

> Ille etiam extincto miseratus Cæsare Romam,
> Quum caput obscura nitidum ferrugine texit,
> Impiaque æternam timuerunt sæcula noctem.

En l'an 553 et en l'an 626 de l'ère actuelle, le Soleil resta obscurci pendant plusieurs mois. Mais ces faits, d'ailleurs mal observés, et rapportés sans doute avec beaucoup d'exagération, se sont présentés à des époques qui paraissent complétement indépendantes les unes des autres; tandis que les variations que nous venons d'étudier offrent une régularité presque astronomique. Quelle peut donc en être la cause?

D'après l'hypothèse la plus plausible, il faudrait les attribuer à l'action des planètes qui, par leur attraction, produiraient de véritables marées sur le globe solaire. La période principale parut d'abord coïncider avec la révolution de Jupiter. Mais M. Carrington a fait voir que cette coïncidence purement accidentelle dans une époque ne se vérifie pas dans les périodes suivantes, et qu'on n'en peut tirer aucune conclusion sérieuse. L'action de Mercure et de Vénus serait peut-être plus efficace. Leur distance au Soleil est peu considérable; mais, d'un autre côté, leur masse nous paraît bien faible pour produire de semblables effets. On ne peut cependant pas trancher cette question sans un examen sérieux; c'est aux astronomes mathématiciens qu'il appartient de l'étudier et de la résoudre.

La période décennale des taches coïncide d'une manière très-inattendue avec un phénomène de météorologie terrestre, la variation de la force magnétique. Nous nous contentons d'indiquer ici ce fait; nous l'étudierons dans la seconde Partie de cet Ouvrage, en parlant de l'influence que le Soleil exerce sur son système planétaire.

Nous allons maintenant étudier les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère solaire. Nous trouverons dans cette étude quelques éclaircissements au sujet des variations dont nous venons de parler. La seule conclusion que nous puissions en tirer actuellement, c'est que le Soleil est un astre sujet à des variations périodiques qui doivent influer sur l'intensité de ses radiations lumineuses et calorifiques, et nous trouverons bientôt d'autres motifs pour le ranger parmi les étoiles variables.



CHAPITRE V.

DE L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE.

Dans les Chapitres précédents, nous avons souvent parlé d'une atmosphère gazeuse et transparente, enveloppant le Soleil, et dont l'existence résulterait nécessairement de la théorie que nous avons admise sur la nature de la couche photosphérique. Nous devons maintenant aborder l'étude de cette atmosphère, et donner des preuves directes de son existence. Ces preuves seront déduites : 1° de l'absorption qu'elle exerce sur les radiations lumineuses, chimiques et calorifiques; 2° des phénomènes qu'on observe pendant les éclipses totales. Ce Chapitre sera consacré à la première de ces deux questions; nous parlerons des éclipses dans le suivant.

§ I. — *Absorption des rayons lumineux par l'atmosphère solaire.*

Dès les premiers temps où commencèrent les études sur le Soleil, Lucas Valérius, de l'Académie des Lincei, remarqua que l'image du Soleil était plus brillante au centre que sur les bords. Ce fait important fut révoqué en doute par Galilée (1), mais il était exact. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner un

(1) GALILÉE, *Œuvres*, t. VI, p. 198.

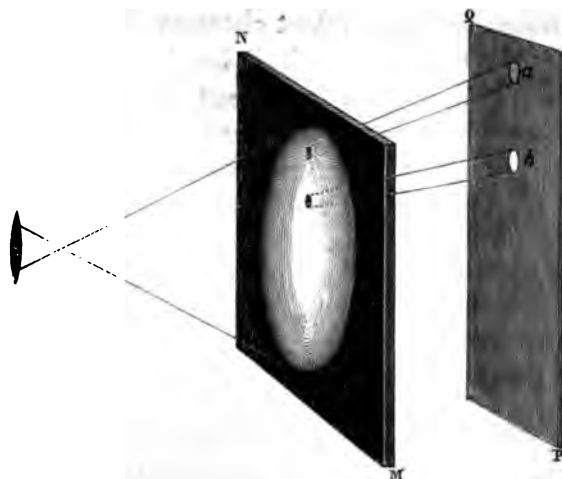
instant dans une chambre noire l'image du Soleil produite à l'aide d'une bonne lunette sur un écran blanc; on reconnaît immédiatement que les bords sont beaucoup moins lumineux. Bouguer essaya de déterminer par des mesures photométriques le rapport qui existe entre l'intensité lumineuse du centre et celle d'un point situé à une distance égale aux $\frac{3}{4}$ du rayon : il trouva ce rapport égal à $\frac{1}{0,729}$; mais près des bords l'intensité décroît beaucoup plus vite.

Arago révoqua en doute les résultats trouvés par Bouguer; mais beaucoup d'observateurs les ont trouvés exacts, et nous les avons vérifiés nous-même. Pour faire ces mesures avec plus de précision, voici le procédé que nous avons employé. Notre équatoriale étant enfermée dans un dôme transformé en chambre noire, nous avons à l'aide d'un fort oculaire produit une projection du Soleil ayant environ un mètre de diamètre. Afin d'affaiblir davantage la lumière, ce qui est une condition essentielle pour apprécier les intensités relatives, nous mettions un diaphragme à l'objectif, et nous faisions réfléchir le rayon émergent sur l'hypoténuse d'un prisme à angle droit. L'image ainsi produite comprenait à peu près la moitié du disque solaire; on la recevait sur un écran noir MN (*fig.* 55) ayant deux ouvertures d'un centimètre de diamètre, et les deux faisceaux lumineux *a* et *b*, reçus sur un écran blanc PQ, étaient examinés par un procédé photométrique. Les deux ouvertures étant mobiles, on pouvait étudier des faisceaux pris à volonté dans une partie quelconque du disque solaire.

Lorsque les rayons ainsi étudiés appartiennent au

centre de l'image, on trouve que la lumière est blanche, et que son intensité est à peu près la même

Fig. 55.



dans tous les points. Lorsqu'on dépasse le quart du rayon, on trouve une différence très-sensible. Mais lorsqu'on arrive auprès du bord, la différence devient extrêmement grande, non-seulement pour l'intensité, mais aussi pour la couleur; la lumière émise par cette partie du Soleil est d'un rouge enfumé, et cette circonstance présente un obstacle très-sérieux à l'exécution des mesures photométriques. Ce phénomène n'a pas encore été remarqué; il est cependant très-important, car cette coloration des bords du disque explique parfaitement la teinte que présente l'horizon pendant les éclipses, au moment où le Soleil ne nous éclaire que par cette zone extérieure.

L'appareil étant disposé de manière à ce que l'un

des deux faisceaux partît du contour même du disque, l'autre d'un point situé à une distance du centre égale aux trois quarts du rayon, le faisceau le plus brillant fut reçu sur un prisme biréfringent, et on obtint ainsi deux nouvelles images dont chacune était plus brillante que celle qui émanait du bord.

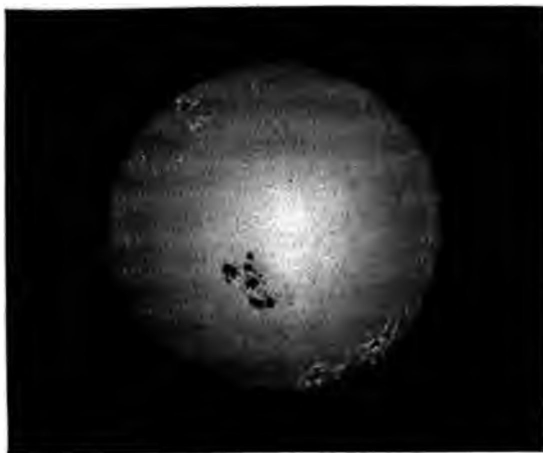
Afin d'évaluer plus facilement l'intensité relative des deux faisceaux, on fit usage d'un photomètre à roue mobile dont les ouvertures étaient variables, et que l'on pouvait faire tourner très-rapidement à l'aide d'un engrenage. Nous trouvâmes ainsi qu'en des points situés, l'un à 1 minute, l'autre à 5 minutes du bord, les intensités lumineuses étaient dans le rapport de 1 à 3. De plus, au second de ces points l'intensité lumineuse était les $\frac{2}{3}$ de celle du centre; de sorte que le rapport entre le point plus éloigné et le centre serait $\frac{1}{3}\times\frac{2}{3}=\frac{2}{9}=\frac{1}{4,5}=0,22$. En prenant des points plus rapprochés du bord, l'intensité serait encore plus faible, mais elle devient très-difficile à évaluer, à cause de la teinte rougeâtre que possède cette région. Les résultats que nous donnons ici sont plus saillants que ceux de Bouguer; nous ne les croyons cependant pas exagérés, et on les trouvera probablement trop faibles si l'on reprend les mêmes expériences, en tenant compte de la différence de couleur dans l'évaluation des intensités. On peut maintenant se rendre compte du manque de netteté et de précision que présente le bord du Soleil dans les observations ordinaires, et surtout dans l'observation des éclipses.

§ II. — *Absorption des rayons chimiques.*

Il y a aussi de très-grandes différences entre les radiations chimiques qui émanent des différents points du disque solaire. Nous avons pu constater ce fait en fixant sur des plaques daguériennes plusieurs phases de l'éclipse de 1851. Dans ces épreuves, le bord intérieur du croissant était parfaitement tranché, tandis qu'on pouvait à peine définir la limite extérieure du corps solaire. Depuis lors, toutes les observations photographiques ont confirmé ce résultat.

Nous reproduisons ici (*fig.* 56) la photographie

Fig. 56.



faite à Ely avec l'héliographe de M. Selvyn, dans laquelle on reconnaît parfaitement la diminution du pouvoir photogénique. Cette diminution est assez

grande pour empêcher d'employer la photographie dans l'étude des dimensions du Soleil; car le diamètre de l'image dépend de la durée de l'exposition, ou de ce qu'on appelle dans les photographies ordinaires le temps de pose.

On devra prévoir cette difficulté, si l'on veut employer la photographie pour étudier le passage de Vénus en 1874. Lorsqu'on veut obtenir des épreuves où le contour du disque soit nettement tranché, l'action de la lumière doit durer assez longtemps; mais alors les taches disparaissent presque complétement, et les pénombres sont complétement effacées, comme nous l'avons remarqué en Espagne. Il est vrai que l'image de Vénus ne saurait disparaître de la même manière, car elle se détachera sur le disque du Soleil comme un cercle complétement noir; mais il se présentera d'autres difficultés que nous ne saurions discuter ici.

La disparition des taches dans les épreuves photographiques s'accorde parfaitement avec les mesures photométriques de M. Chacornac, donnant à l'intensité lumineuse des bords solaires une valeur à peu près égale à celle des pénombres.

La mesure exacte des variations du pouvoir photogénique aux différents points du disque solaire est extrêmement difficile, et on ne l'a pas encore effectuée.

§ III. — *Absorption des rayons calorifiques.*

Pour déterminer la température relative des différents points du Soleil, nous nous sommes servi de l'appareil destiné aux projections; l'écran sur lequel

se produit l'image était percé au centre d'une ouverture derrière laquelle on plaçait une pile thermo-électrique extrêmement sensible. Le galvanomètre était placé sur un support scellé au mur, de manière à éviter toutes les vibrations qu'aurait pu produire le mouvement du dôme. Un diaphragme, recouvert de velours noir, était placé derrière la pile, afin d'empêcher tous les rayons étrangers de venir troubler l'expérience; dans le même but, on tendait des draps noirs sur le parquet et autour du dôme. Sur le diaphragme antérieur, une règle graduée en parties du diamètre solaire faisait immédiatement connaître la position du point observé par rapport au centre ou au contour.

Dans une première expérience faite le 19 mars 1852 (1), la pile étant complétement ouverte et l'image médiocrement agrandie, la déviation du galvanomètre fut de 31 degrés pour le centre, et de 21 degrés pour une surface égale prise auprès du bord. Afin d'obtenir des résultats plus exacts, on adapta à la pile un diaphragme dont la surface équivalait à peu près à un carré ayant pour côté un arc d'une minute, et on régla l'instrument de manière à obtenir des variations de température proportionnelles aux angles d'écart de l'aiguille. Pour rendre les résultats toujours comparables entre eux, on représenta par 100 le rayonnement

(1) Nous marquons cette date, car dans les *Atti* de l'Académie des Lincei, il y a une grande confusion dans les dates des publications. Certaines expériences postérieures aux nôtres ont été publiées avec une date antérieure à celle qui leur convient. Personne ne s'est occupé de cette question avant nous.

observé au centre, et on obtint ainsi la table suivante:

DISTANCE DE LA PILE au centre du Soleil, exprimée en minutes.	NOMBRE exprimant la radiation de chaque point.
+ 14′,90	57,39
+ 11,31	88,81
+ 1,77	99,48
— 10,90	81,32
— 14,88	54,34

Ces observations ont été faites du 19 au 23 mars 1852. Le signe + indique la partie du disque située au-dessus du centre; le signe — indique la partie située au-dessous.

Dans ces expériences, il nous fut impossible d'approcher du bord à moins d'une minute. Plus tard, en répétant les mêmes observations avec le grand équatorial de Merz, nous avons pu aller plus loin, et nous avons trouvé une diminution encore plus sensible. Mais à cette limite extrême, même en employant les moyens d'observation les plus précis, on rencontre des difficultés qu'il est impossible de surmonter complétement. On est obligé, sous peine d'obtenir des résultats très-irréguliers, de laisser à la pile une certaine ouverture; mais alors la région que l'on examine est loin de posséder une radiation uniforme. De plus il est impossible d'étudier isolément le bord, car les mouvements inévitables de l'image ne permettent pas de le retenir exactement au même point de la pile. Aussi, nous n'avons pas pu pousser l'exactitude aussi loin que nous espérions, et nous avons cessé de poursuivre ces recherches; cependant les résultats obtenus sont assez intéressants.

Les nombres que nous avons cités dans le tableau précédent conduisent à deux conclusions : I. La température, comme la lumière, diminue dans le disque solaire, du centre à la circonférence. Ce fait, alors contesté, fut mis hors de doute par nos expériences. II. La chaleur n'est pas symétriquement répartie dans les deux hémisphères. Pour expliquer ce fait, qui ressort évidemment de nos chiffres, on ne peut faire que trois hypothèses : 1° la différence serait due à une influence de l'atmosphère terrestre; 2° elle existerait dans le Soleil lui-même, mais serait purement accidentelle; 3° elle serait constante, et alors elle mériterait d'être étudiée avec soin.

Pour éliminer la première de ces causes, on fit l'étude comparative de deux points situés symétriquement de part et d'autre de l'équateur solaire, en examinant d'abord le point le plus bas, puis en observant le point le plus élevé un peu plus tard, lorsqu'il fut arrivé à la même hauteur que le précédent; de cette manière, l'influence de l'atmosphère terrestre, étant la même dans les deux cas, devait disparaître dans les différences. Les résultats furent les mêmes qu'auparavant, ce qui montre que la première hypothèse doit être abandonnée.

La seconde ne vaut pas mieux, car les observations furent prolongées pendant plusieurs rotations consécutives sans que les nombres fussent modifiés.

Les différences sont donc constantes, et leur cause réside dans le Soleil. Mais quelle est cette cause? Est-ce une différence réelle de température? N'était-ce pas plutôt la position particulière de l'équateur solaire, qui se projetait alors sur le disque au-dessus du centre?

Pour résoudre cette question, on prolongea les observations jusqu'au mois de septembre, époque à laquelle l'équateur se trouvait projeté sur l'hémisphère opposé. Le résultat fut le suivant : jusqu'au mois d'août, on trouva que la température était plus élevée dans l'hémisphère supérieur; mais plus tard, et surtout pendant le mois de septembre, la différence fut le plus souvent en sens contraire. Le tableau suivant contient les moyennes des résultats obtenus du 8 au 15 septembre :

Distance au centre.	Radiation en degrés.
+ 14′,2	10°,3
+ 10,5	14,6
centre 0,0	17,8
— 10,5	15,48
— 14,2	10,4

Ces résultats sont évidemment en désaccord avec ceux du mois de mars, et la comparaison attentive de ces deux époques conduit aux conclusions suivantes : 1° la température est plus élevée dans les régions équatoriales; 2° cependant l'hémisphère nord paraît un peu plus chaud que l'hémisphère sud.

Pour contrôler ce dernier résultat, que sa singularité même recommandait à notre attention, nous avons employé le procédé suivant.

Soient *bd* (*fig.* 57) l'axe de l'ellipse suivant laquelle se projette l'équateur solaire au mois de mars, *ab* et *cd* les cordes des deux parallèles menées par les extrémités *b* et *d* de cette ellipse. Si l'équateur solaire possède une température plus élevée que les zones voisines, les points *b* et *d* doivent être plus chauds que

les points *a* et *c*. Au contraire, lorsque l'équateur se projette suivant *ac* (*fig*. 58), les points *a* et *c* doivent

Fig. 57.

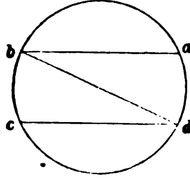
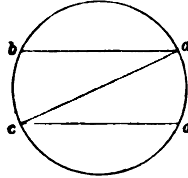


Fig. 58.



être à une température plus élevée que les points *b* et *d*. Avec cette méthode, on peut éliminer l'effet produit par l'atmosphère terrestre en observant près du méridien. Nous avons fait ainsi un grand nombre d'observations d'abord avec l'équatorial de Cauchoix, puis avec l'équatorial de Merz. Les résultats qui se trouvent exposés dans les Mémoires de notre Observatoire ont toujours été concordants, et ils nous ont fourni les moyennes suivantes :

1° Pour le mois de juin (*fig*. 57),

a	*b*	*c*	*d*
17°,1	17°,8	16°,6	17°,6

2° Vers la fin de septembre (*fig*. 58),

a	*b*	*c*	*d*
20°,2	19°,7	21°,1	20°,0

On reconnaît parfaitement que sur l'équateur la température est maximum. De plus, si l'on compare avec l'équateur le 30e parallèle, les températures de ces deux points sont entre elles dans le rapport de

9.

15 à 16. On trouve des différences encore plus saillantes en prenant pour termes de comparaison des points plus rapprochés des pôles; mais nous ne les avons pas utilisées, afin d'éviter l'influence des différences de hauteur et de réfraction. Nous n'avons jamais observé de variation de température aux différentes longitudes; nous n'oserions cependant pas affirmer qu'il n'en existe point, et peut-être en découvrira-t-on dans des recherches postérieures. Nous avons toujours trouvé une température plus basse dans les taches et dans les régions qui les environnent; aussi avons-nous noté de nombreuses anomalies dans les lois que nous cherchions à reconnaître, lorsque nous étions conduit à observer un point voisin d'une tache.

Il y aurait lieu de répéter ces observations de temps en temps, afin de voir si les lois que nous avons indiquées sont bien constantes; mais nous en avons été détourné par d'autres occupations. Du reste, ces recherches ne sont pas aussi faciles qu'on pourrait le croire : elles demandent beaucoup de patience; les conditions météorologiques gênent souvent les observations, même dans la saison la plus favorable; aussi beaucoup de séries demeurent-elles incomplètes, et par conséquent inutiles. Ajoutons que, dans les pays chauds, ces observations sont très-pénibles en été, et cependant c'est alors qu'elles seraient plus faciles et plus profitables.

§ IV. — *Conséquences qui découlent des observations précédentes.*

Les faits que nous venons d'énoncer conduisent directement aux conclusions suivantes :

1° Toutes les radiations éprouvent une absorption considérable qui va en croissant depuis le centre du disque solaire jusqu'au bord, où cette absorption atteint son maximum ;

2° Les régions équatoriales sont à une température plus élevée que les régions situées au delà du 30e degré de latitude, et la différence est au moins de $\frac{1}{16}$;

3° La température est un peu plus élevée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud ;

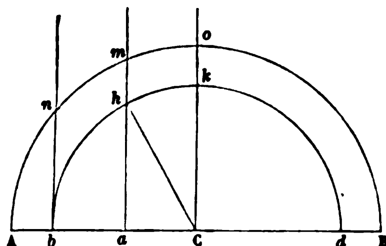
4° De même que les taches émettent moins de lumière, elles émettent aussi moins de chaleur que les autres régions.

La première de ces conclusions nous permet de démontrer rigoureusement qu'il existe une atmosphère autour du Soleil. Pour bien comprendre notre raisonnement, il faut se rappeler les principes sur lesquels s'appuient les astronomes pour analyser les effets dus aux atmosphères des corps célestes.

Soient *bkd* (*fig.* 59) la surface du Soleil, A*o*B la surface extérieure de son atmosphère. Les rayons émis par le corps solaire traverseront une couche atmosphérique dont l'épaisseur sera d'autant plus grande qu'ils seront partis d'un point plus éloigné du centre. La plus petite épaisseur sera *ok*, pour un rayon partant du centre ; la plus grande sera *bn*, pour un rayon partant du bord ; elle prendra une valeur intermé-

diaire, telle que *hm*, pour un point situé entre le bord

Fig. 59.



et le centre. Des observateurs placés dans le Soleil en ces différents points apercevraient la Terre à des hauteurs zénithales différentes. Au point *k*, correspondant au centre du disque solaire, la Terre apparaîtrait au zénith ; du point *b*, on la verrait à l'horizon ; du point *h*, situé entre deux, on la verrait à une distance du zénith mesurée par l'angle *h*C*k*. Dans ce trajet, les rayons qui sortent de l'atmosphère solaire se trouvent dans les mêmes conditions, quant aux résultats, que ceux qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre ; ainsi, le maximum d'absorption a lieu pour le bord où le rayon sort horizontalement ; le minimum correspond au centre, où le rayon sort suivant la verticale. Il est facile de calculer, d'après la théorie, l'absorption qui correspond à un point donné d'où la Terre serait vue à une distance zénithale θ, cet angle étant également celui que font avec la verticale du lieu les rayons qui se dirigent vers la Terre. En prenant la moyenne des nombres que nous avons donnés dans nos tableaux, on arrive aux résultats suivants :

Distance au centre.	Valeur de θ.	Intensité lumineuse.
0',00	0°. 0'	100,00
11,10	43.55	85,06
14,92	68.38	55,86

En introduisant ces nombres dans les formules, on peut calculer l'absorption produite en un point quelconque de la surface solaire; on trouve ainsi qu'en un point qui correspond aux $\frac{3}{4}$ du rayon, elle est égale à 0,725. Bouguer avait trouvé 0,729. On ne saurait désirer une coïncidence plus parfaite.

On voit que la quantité de chaleur qui parvient à s'échapper du Soleil se trouve singulièrement réduite par l'action atmosphérique; mais comme cette action n'est pas la même pour tous les points, on est conduit à se poser les deux questions suivantes : 1° quelle est l'absorption exercée par l'atmosphère dans la direction de sa plus faible épaisseur, c'est-à-dire pour $\theta = 0$? 2° quelle est l'absorption totale, et par conséquent quelle serait la radiation absolue, s'il n'y avait pas d'atmosphère? On peut répondre à ces questions en employant les formules connues, bien qu'elles ne soient qu'approchées, car les données relatives au Soleil ne sortent pas des limites que les astronomes ont adoptées en établissant ces formules.

Les résultats sont inscrits dans le tableau suivant. On trouve dans la première colonne la position du point qui a servi de base au calcul; dans la deuxième, la valeur correspondante de l'angle θ, c'est-à-dire la distance zénithale de la Terre vue du Soleil; dans la troisième, l'intensité de radiation qui reste après l'absorption pour le point situé au centre du disque,

la radiation totale étant exprimée par l'unité; enfin, la quatrième indique la fraction de la radiation totale qui parvient à sortir de l'atmosphère solaire, et se répand réellement dans l'espace.

POSITION sur le rayon.	VALEUR de l'angle θ.	INTENSITÉ résiduelle au centre.	INTENSITÉ résiduelle totale.
0,666	43°.35'	0,2833	0,1019
0,750	48.34	0,2606	0,0794
0,875	68.49	0,4045	0,1711
	Moyenne....	0,3095	0,1172

Les chiffres de la dernière colonne devraient être identiques entre eux, mais on voit facilement que ces résultats sont loin d'être parfaitement d'accord; cela peut tenir aux hypothèses adoptées, qui ne sont sans doute pas applicables d'une manière rigoureuse à l'atmosphère solaire. Malgré cela, nous pouvons de ce tableau tirer deux conclusions très-frappantes : 1° au centre du disque, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface de la photosphère, l'absorption arrête les $\frac{2}{3}$ environ, ou plus exactement les $\frac{62}{100}$, de la force totale; 2° l'action totale de cette enveloppe absorbante sur l'hémisphère visible du Soleil est tellement grande, qu'elle ne laisse sortir que les $\frac{12}{100}$ de la radiation totale, le reste, c'est-à-dire $\frac{88}{100}$, étant absorbé. En d'autres termes, si le Soleil était dépouillé de son atmosphère absorbante, il nous paraîtrait huit fois plus chaud et plus brillant qu'il ne paraît actuellement.

Cette influence surprenante de l'atmosphère solaire

a l'avantage d'empêcher une dispersion trop grande et trop rapide de la chaleur solaire. La force vive des radiations reste ainsi emmagasinée dans l'atmosphère du Soleil, et contribue à conserver sa haute température. L'absorption ne produit aucune perte réelle; elle ne détruit point les radiations qu'elle arrête au passage; elle empêche une dispersion qui serait inutile et même nuisible pour les planètes. Que deviendrait, en effet, notre globe sous une radiation huit fois plus grande que celle qui se produit actuellement? L'expérience prouve que, dans les climats où le ciel est pur, on ne peut pas impunément rester exposé aux rayons du Soleil si l'on double leur puissance par une simple réflexion sur un miroir plan; si donc le rayonnement devenait huit fois plus considérable, aucune créature ne pourrait plus vivre sur notre planète.

Il faudra tenir compte de cette absorption atmosphérique lorsqu'on voudra essayer d'évaluer la température du Soleil, car les calculs qu'on ferait sans en tenir compte donneraient évidemment un résultat huit fois trop faible.

Du reste, il n'est pas surprenant qu'une atmosphère si considérable possède un grand pouvoir absorbant, car l'atmosphère terrestre, qui nous paraît si transparente, absorbe suivant la verticale un quart des rayons qui tombent sur sa surface supérieure.

L'atmosphère solaire possède-t-elle une absorption élective et une thermochrose spéciale? Melloni nous adressa lui-même cette question, et pour y répondre nous avons eu recours à un grand nombre d'expériences; nous avons fait passer les rayons solaires à travers différentes substances : l'eau, le verre, le

quartz enfumé, etc., mais nous n'avons obtenu aucun résultat bien certain. Cela tient évidemment à ce que, à l'influence de l'atmosphère solaire, vient s'ajouter celle de l'objectif et de l'oculaire, influence bien suffisante pour dépouiller les rayons qu'on observe des éléments déjà connus comme étant les plus thermochroïques.

Nous verrons plus tard que les radiations solaires ne sont pas homogènes, même lorsqu'elles nous arrivent suivant la verticale, et qu'il existe sans doute une thermochrose; mais cette étude demanderait des instruments plus délicats que ceux dont nous disposons.

La belle experience de M. Tyndall sur la calorescence, c'est-à-dire sur la transmission isolée des rayons obscurs à travers une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, est un fait qui prouve l'existence d'une véritable thermochrose. Nous en parlerons plus tard en discutant la composition de l'atmosphère solaire; pour le moment, qu'il nous suffise d'en avoir constaté l'existence, et d'avoir montré l'énorme pouvoir absorbant qui en résulte.

CHAPITRE VI.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT LES ÉCLIPSES; CONSÉQUENCES QU'ON EN PEUT TIRER RELATIVEMENT A L'ATMOSPHÈRE DU SOLEIL.

---

§ I. — *Historique.*

Les éclipses totales du Soleil étaient jadis un sujet de terreur pour les populations ignorantes et superstitieuses; elles sont devenues pour la science une source de renseignements précieux relativement à la constitution de l'atmosphère solaire. L'astre du jour, cessant alors d'illuminer notre atmosphère, nous permet d'étudier certains phénomènes, curieux et instructifs, très-utiles au but que nous nous sommes proposé. Nous ne pouvons donc pas négliger cette question; nous l'étudierons dans tous ses détails à la fois si complexes et si intéressants. Commençons par quelques notions générales qui sont absolument essentielles.

Les éclipses totales ont toujours été observées avec empressement et décrites avec enthousiasme; mais c'est depuis un quart de siècle seulement qu'on les étudie d'une manière parfaitement rationnelle. Depuis cette époque, la perfection des Tables solaires et lunaires, l'exactitude des données géographiques, ont permis aux astronomes de calculer d'avance d'une manière rigoureuse la ligne que doit tracer sur notre globe

le centre de l'ombre lunaire, sa largeur exacte et la durée précise du phénomène. Alors seulement les astronomes ont pu se déplacer en toute sûreté pour aller observer les éclipses, sans s'exposer comme autrefois à perdre le fruit d'expéditions laborieuses.

L'observation des éclipses se réduisait naguère à la détermination de l'instant précis où avait lieu l'occultation; les résultats étaient utilisés pour corriger les Tables du Soleil et de la Lune, et pour connaître avec plus de certitude le rapport du diamètre de ces deux astres. Comme ces calculs se font tout aussi bien en prenant pour point de départ l'observation d'une éclipse partielle, il n'y avait pas un intérêt spécial à faire de longs voyages, afin de se trouver dans la zone de la totalité. Mais de nos jours, les astronomes, encouragés par les nouveaux moyens d'observation dont ils disposent, s'occupent d'une manière plus spéciale de l'étude physique des corps célestes. Il faut donc diriger vers ce but l'observation des éclipses, ce qui n'est possible qu'à la condition de se transporter dans cette zone privilégiée où l'occultation du Soleil est complète.

C'est en 1842 que pour la première fois l'attention des savants fut portée sur ce point. On observa des phénomènes qu'on n'avait pas soupçonnés jusqu'alors, et ce fut comme une révélation véritable; un horizon nouveau semblait s'offrir à la contemplation des savants, et l'on ne négligea aucun moyen pour l'étudier avec soin. Depuis cette époque, en effet, un grand nombre d'astronomes entreprirent simultanément des voyages, quelquefois bien longs, pour aller observer chacune des éclipses qui ont eu lieu. Ces voyages présentent de très-grands avantages. En multipliant le

nombre des postes d'observation, et en les choisissant convenablement, on prévient les désagréments qui, pour un observateur isolé, peuvent si facilement résulter de l'état du ciel; mais surtout on peut distinguer à coup sûr ce qui est accidentel dans les phénomènes, de ce qui est indépendant des observateurs et des circonstances de l'observation; enfin, une division intelligente du travail permet d'observer ces phénomènes aussi complétement que possible, malgré leur courte durée; aussi a-t-il suffi d'un petit nombre d'éclipses pour faire avancer rapidement l'étude de la constitution physique du Soleil; indiquons les principales.

1° Nous devons mettre en première ligne celle de 1842 qui fut observée en France par les astronomes français, en Italie par les Anglais et les Italiens, en Autriche par les Allemands. Arago a discuté ces observations dans un savant Mémoire inséré dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1846.

2° L'éclipse de 1851 a été observée en Suède par les Anglais, les Allemands et les Russes; une collection précieuse d'observations a été publiée dans le tome XXI des *Mémoires de la Société Astronomique de Londres*.

3° L'Amérique a fourni aussi son contingent : l'éclipse du 30 octobre 1853 a été observée par Moesta, celle du 7 septembre 1858 par Gillis et par les Brésiliens; celles de 1865 et de 1867 par le P. Cappelletti, l'astronome Moesta et quelques autres savants. Ces observations ont beaucoup contribué à assurer la généralité de certains phénomènes dont l'importance est devenue par là beaucoup plus grande.

4° En 1860, les astronomes les plus habiles de l'Eu-

rope s'étaient donné rendez-vous en Espagne; les observations nombreuses qui furent faites, et surtout les photographies qu'on obtint en deux points différents, font de cette éclipse l'une des plus importantes et des plus fertiles en conclusions.

5° Tous ces travaux ont été couronnés le 18 août 1868. L'éclipse présentait une circonstance des plus favorables dans sa longue durée, six minutes vingt-cinq secondes, c'est presque la plus longue possible. C'est ce qui engagea les gouvernements à faire des dépenses considérables, et encouragea les savants à affronter les fatigues de longs et rudes voyages pour aller s'installer dans des pays à peine civilisés. Ces sacrifices ont reçu leur légitime récompense, comme nous le reconnaîtrons bientôt en étudiant les découvertes fécondes qui en ont été le fruit.

6° Enfin, il faut faire mention de l'éclipse qui eut lieu dans l'Amérique du Nord, le 7 août 1869, dans laquelle on a vérifié un grand nombre des conclusions obtenues en 1860 à l'aide de la photographie.

Dans cet exposé, il nous sera impossible de suivre pas à pas chacune des relations que la science possède; nous en tirerons seulement ce qui sera utile à notre but, en nous appuyant principalement sur ce que nous avons observé nous-même en 1860; nous étions installé dans des conditions très-favorables, au *Desierto de las Palmas*, sur le sommet du mont Saint-Michel, à une hauteur de 725 mètres au-dessus du niveau de la mer, sur un pic isolé d'où nous découvrions un horizon magnifique et très-étendu; le ciel y était d'une pureté admirable qui facilita beaucoup nos observations. Quant aux détails qui ne pourront

pas trouver place ici, nous renverrons le lecteur aux Mémoires de notre Observatoire pour l'année 1863, et aux autres publications de l'époque; indiquons surtout la belle description de M. de la Rue que nous citerons souvent, et qui se trouve dans les *Philosophical Transactions*, année 1862.

§ II. — *Phénomènes généraux qu'on observe dans une éclipse totale.*

Une éclipse ne commence à présenter un intérêt vraiment sérieux qu'à partir du moment où le centre du Soleil est couvert par la Lune. La lumière commence alors à diminuer d'une manière très-sensible, et lorsque approche le moment de la totalité, cette diminution est tellement rapide, qu'elle a quelque chose d'effrayant. Ce qui frappe alors, ce n'est pas seulement l'affaiblissement de la lumière, c'est surtout le changement de couleur que présentent les objets. Tout devient triste, sombre et comme menaçant. Le paysage le plus vert se recouvre d'une teinte grise; dans les régions les plus élevées et les plus voisines du Soleil, le ciel prend une couleur de plomb, tandis qu'auprès de l'horizon il devient d'un jaune verdâtre. Le visage de l'homme présente une teinte cadavérique analogue à celle que produit la flamme de l'alcool saturé de chlorure de sodium. Cette teinte jaunâtre et surtout l'abaissement de la température semblent accuser une diminution dans la puissance vitale de la nature.

En même temps, un silence général s'établit dans l'atmosphère : les petits oiseaux disparaissent, les

insectes se cachent; tout semble présager un imminent et terrible désastre. On conçoit très-bien, dit M. Forbes, que les populations ignorantes soient saisies d'une immense frayeur en voyant ainsi pâlir l'astre du jour, et qu'elles se figurent assister au commencement d'une nuit éternelle. Le P. Faura nous dit que, dans la dernière éclipse de 1868, des Chinois se jetèrent dans des embarcations afin d'échapper au désastre; ils ne furent pas même rassurés par la présence des astronomes qui étaient là avec leurs instruments tout prêts à faire leurs observations!

Des circonstances secondaires, qui n'ont d'ordinaire aucune importance, contribuent quelquefois singulièrement à donner à ces impressions quelque chose de saisissant. Ainsi, en 1842, un nuage qui s'épanouissait à une petite distance du Soleil, paraissait aux yeux de M. Airy comme une masse énorme se précipitant sur la Terre avec une rapidité effrayante.

Tous les observateurs s'accordent pour décrire ces émotions. Nous-même, quoique mieux préparé que personne, nous fûmes saisi par un sentiment d'oppression et, disons-le, de frayeur involontaire; il fallut toute la puissance de notre volonté pour nous rendre maître de toutes nos facultés à la vue de ce phénomène imposant.

Lorsque l'observateur est favorablement placé, il lui est facile de suivre la marche de l'ombre totale qui s'avance comme un orage sombre et menaçant. De la hauteur du mont Saint-Michel, nous vîmes cette colonne noire envahir la plaine bien plus rapidement que ne peut le faire un orage, et avec une vitesse analogue à celle d'une locomotive lancée à toute va-

peur. C'est alors que nous fûmes surtout frappé par le silence solennel qui s'empare de la nature pendant cette nuit momentanée. Nous étions entouré d'une foule curieuse et bavarde, dont les conversations incessantes nous avaient bien contrarié pendant tout le jour. Mais lorsque approcha le moment solennel, tout devint tranquille, et nous pouvions compter les battements de notre chronomètre aussi facilement que nous l'aurions pu faire à minuit dans la solitude d'un observatoire. Tous les yeux et toutes les attentions étaient fixés sur le mince croissant du Soleil qui allait disparaître.

Dans ces derniers instants, le croissant diminue avec une rapidité surprenante; bientôt il est réduit à un mince filet terminé par des pointes très-aiguës; les proéminences du contour lunaire le divisent souvent en plusieurs parties; enfin, il disparaît.

Aussitôt la scène change d'une manière subite et complète. Au milieu d'un ciel couleur de plomb se détache un disque parfaitement noir, entouré d'une gloire magnifique de rayons argentés, parmi lesquels scintillent des jets de flammes roses. Ce spectacle est à la fois terrible et sublime. Pour le faire mieux comprendre transcrivons simplement la description naïve des impressions que l'astronome anglais Baily éprouva en 1842, alors que les savants étaient moins familiarisés avec ces phénomènes.

« J'étais, dit-il, tout occupé à compter les oscillations de mon chronomètre, afin de saisir l'instant précis de la disparition totale, plongé dans un silence profond au milieu de la foule qui se pressait dans les rues, sur la place et aux fenêtres des maisons, et

dont l'attention était tout entière absorbée par le spectacle qu'elle contemplait. Tout à coup, le dernier rayon disparaît, et je suis assourdi par une explosion d'applaudissements et de bravos qui éclatent au milieu de cette immense multitude. Toutes mes fibres s'électrisent, et un frémissement s'empare de moi; je regarde le Soleil, et je me trouve en face du spectacle le plus ravissant que l'imagination puisse créer. L'astre du jour était remplacé par un disque noir comme la poix, environné d'une gloire brillante analogue à celle qu'on représente autour de la tête des Saints (*fig.* 60).

Fig. 60.



» A cette vue je demeurai saisi d'étonnement; je perdis une portion considérable de ces moments précieux, et je fus sur le point d'oublier le but de mon voyage. Je m'attendais bien, d'après les descriptions

que j'avais lues, à voir autour du Soleil une certaine lumière, mais faible et crépusculaire; tandis que je voyais une auréole brillante dont l'éclat, très-vif sur le bord du disque, diminuait graduellement, et disparaissait à une distance égale à peu près au diamètre de la Lune. Je n'avais rien prévu de semblable.

» Je fus bien vite revenu de mon étonnement, et je mis de nouveau l'œil à ma lunette, après avoir ôté le verre noir de l'oculaire. Une nouvelle surprise m'attendait. La couronne de rayons qui entourait le disque lunaire était interrompue en trois points par d'immenses flammes de couleur de pourpre dont le diamètre était d'environ 2 minutes. Elles paraissaient tranquilles et présentaient le même aspect que les sommets neigeux des Alpes éclairés par le Soleil couchant. Il me fut impossible de distinguer si ces flammes étaient des nuages ou des montagnes; pendant que je cherchais à les étudier pour en déterminer la nature, un rayon de Soleil brille dans les ténèbres, vient révivifier la nature, mais me plonge dans cette tristesse qu'éprouve une personne qui voit disparaître l'objet de ses vœux au moment où elle était sur le point de le saisir. »

Quelque habitude qu'on ait de ces phénomènes, l'impression qu'ils produisent sur l'observateur n'en est pas moins vive. Il est impossible de regarder avec indifférence ce disque noir qui remplace le Soleil, et l'auréole argentée qui l'environne, étalée sur un ciel couleur de plomb qui ne fait qu'augmenter le contraste.

L'obscurité qui règne au moment où l'éclipse est totale dépend beaucoup de l'état du ciel. En général,

on peut la comparer à celle qui règne une demi-heure ou trois quarts d'heure après le coucher du Soleil, lorsqu'on ne voit encore que les étoiles les plus brillantes. Mais ordinairement on aperçoit Vénus longtemps avant le moment de la totalité. Par un effet de contraste dû à la disparition rapide de la lumière, l'obscurité paraît plus grande qu'elle ne l'est en effet. En général, on peut lire un livre imprimé en gros caractères, mais il est impossible de distinguer nettement la graduation des instruments, et de voir l'heure sur une montre : aussi les observateurs doivent-ils avoir des lampes allumées pour lire les chronomètres et les instruments gradués.

La couronne, lorsque le ciel est bien pur, a une étendue égale au diamètre de la Lune; mais elle ne brille d'un vif éclat que dans des limites bien plus restreintes. Elle laisse souvent échapper des rayons ou aigrettes d'une longueur considerable dont nous aurons occasion de parler plus tard. Les flammes rouges sont souvent visibles à l'œil nu, et, au *Desierto*, les paysans disaient que le Soleil *avait du feu* (el Sol tiene fuego). Pendant la dernière éclipse de 1868, elles présentaient l'aspect de tours implantées sur la Lune; quelques observateurs, par une illusion d'optique, les prenaient pour des échancrures du disque lunaire.

Le premier rayon de Soleil fait disparaître toute cette scène magique; le Soleil brille comme une lampe électrique, projetant des ombres tranchées, mais dont les bords sont vacillants; on croit voir des ondes lumineuses se propager comme des bandes ondoyantes et serpentantes La nature encore sombre

semble reprendre sa gaieté ordinaire, le sentiment de tristesse qui s'était emparé de tous les spectateurs fait place à une impression douce et joyeuse.

On peut, pendant quelque temps, suivre la marche de l'ombre qui s'éloigne, et du sommet du mont Saint-Michel, nous pûmes voir le cône sombre envelopper d'abord les îles Columbrètes, et se répandre ensuite sur la surface lointaine de la mer.

Telle est en peu de mots la scène que présente une éclipse totale. Les descriptions qu'on en a faites sont souvent exagérées, mais cette exagération même est une preuve de l'impression profonde qu'éprouvent tous les spectateurs. Quoique prévenus par les écrits de leurs devanciers, les observateurs de la dernière éclipse ont éprouvé les mêmes émotions ; les savants ont beaucoup de peine à faire leurs travaux, et à se détacher de la contemplation passive du grand spectacle que leur offre la nature. M. de la Rue nous disait, et il l'a imprimé dans son Mémoire, qu'à la première occasion il se déplacerait volontiers pour aller contempler une autre éclipse, mais en simple amateur et sans instruments, afin de jouir à son aise des impressions qu'il a été obligé de maîtriser en 1860.

Terminons ici cet aperçu général, et entrons dans la discussion des détails scientifiques qui ont pour nos lecteurs et pour nous un intérêt tout particulier.

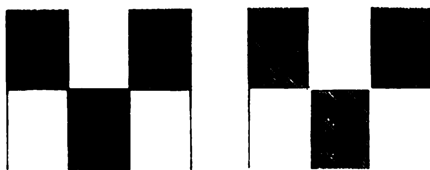
§ III. — *Phénomènes qui accompagnent la disparition et la réapparition du Soleil dans les éclipses totales.*

Avant de disparaître complétement, le Soleil se réduit d'abord à un mince croissant terminé par des

pointes très-aiguës. Au dernier moment, ce filet est souvent découpé par les sommets des montagnes qui se trouvent sur le bord lunaire, et on peut prévoir ce phénomène d'après la forme du contour de la Lune que l'on voit depuis longtemps se projeter sur le Soleil. Si les montagnes sont nombreuses, le filet se brise en donnant naissance à une foule de points brillants qui ressemblent à des grains de chapelet. Cette apparence est assez simple à comprendre; elle dépend d'un phénomène d'irradiation dont les effets sont encore exagérés par les défauts de la lunette, ou par l'imperfection de la mise au point. Entrons dans quelques détails.

Lorsque nous regardons un corps très-lumineux, il nous paraît toujours plus grand qu'il ne l'est réellement. Ainsi éclairons vivement une carte découpée comme l'indique la *fig.* 61; elle nous présentera l'apparence indiquée par la *fig.* 62; la partie blanche pa-

Fig. 61. Fig. 62.



raît dilatée en sorte qu'au centre, les angles qui se touchent réellement paraissent détachés l'un de l'autre.

Tout le monde connaît le phénomène curieux de la lumière cendrée qui se présente dans les premiers jours de la nouvelle Lune; outre le croissant vivement éclairé par le Soleil, on distingue nettement le reste

du disque faiblement éclairé; mais, par un effet d'irradiation, le croissant semble appartenir à un disque plus grand que celui de la Lune.

L'irradiation donne encore lieu à un phénomène important et qui rend difficile l'observation du passage des planètes sur le Soleil. Supposons qu'on cherche à déterminer l'instant précis du second contact intérieur. La planète se détache très-nettement comme un petit cercle noir sur le disque brillant du Soleil; elle est encore à une certaine distance du contour, lorsque l'observateur voit se former un cordon ou ligament noir (*fig.* 63) qui va en s'élargissant de plus en plus jusqu'au moment où les deux disques semblent tangents intérieurement; l'observateur reste donc incertain du moment précis où a eu lieu le contact, ne sachant s'il doit noter le moment où s'est formé le filet noir, ou celui du contact apparent (*fig.* 64).

Fig. 63.

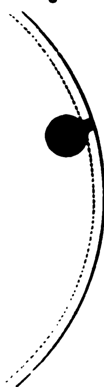
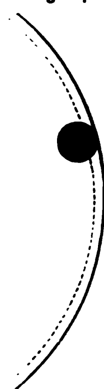


Fig. 64.

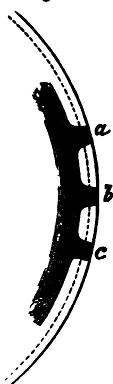


Tout devient facile à expliquer si l'on remarque que le Soleil, par un effet d'irradiation, doit nous paraître plus grand qu'il ne l'est en réalité. Il est limité, non par son contour apparent, mais par un cercle d'un plus petit diamètre, que nous indiquons par une ligne ponctuée. Lorsque la planète arrive à cette limite, le contact a réellement lieu, tous les rayons lumineux venant de cette région du Soleil sont interceptés, et le filet doit se former. Ainsi donc, pour les contacts intérieurs, ce qu'il faut ob-

server avec soin, c'est à l'entrée le moment où le filet se brise, à la sortie celui où il se forme. Le P. Hell a soigneusement remarqué ces phénomènes en 1768, dans son observation du passage de Vénus; aussi sommes-nous surpris qu'on ait tant décrié cette observation, la plus détaillée peut-être de celles qui furent faites alors. M. Faye a rendu meilleure justice au P. Hell; après avoir discuté ses résultats, il ajoute : « Il nous sera difficile de faire mieux en 1874. »

Ce qu'on observe pour les planètes se vérifie aussi pour la Lune pendant les éclipses. Soient *a*, *b*, *c* (*fig.* 65) une série de proéminences lunaires; lorsqu'elles arriveront au bord véritable du Soleil indiqué par la ligne ponctuée, elles devront former une série de filets noirs; l'anneau apparent se trouvera ainsi séparé en plusieurs parties, qui prendront facilement la forme de grains irrégulièrement arrondis, si aux circonstances que nous venons d'indiquer vient s'ajouter une certaine imperfection dans la lunette ou dans la mise au point.

Fig. 65.



Dans notre observation au *Desierto*, nous avons vu les pointes très-effilées du croissant se briser, mais sans que les fragments offrissent l'apparence des grains de chapelet; cela tient à l'absence de longues chaînes de montagnes, mais aussi à l'excellente lunette de Fraunhofer que nous avons employée. M. de la Rue a fait les mêmes remarques, et tous les observateurs sont unanimes à reconnaître que ces illusions diminuent beaucoup lorsqu'on a soin de mettre exacte-

ment au point en faisant mouvoir de temps en temps l'oculaire, à cause des variations causées par les changements de température.

Pour bien étudier la disparition du croissant il faut que l'oculaire soit garni d'un verre gradué, et on doit le tenir à la main afin de pouvoir en modifier la position, et l'enlever au dernier instant. On reconnaît alors que la lumière est très-faible auprès du bord. Ainsi, en regardant par la partie moyenne de notre verre, nous aurions jugé que le Soleil était disparu, tandis qu'il était encore très-visible dans la partie la plus mince. Deux ou trois secondes avant la disparition totale, nous vîmes la couronne, encore très-pâle, mais nettement formée.

Le dernier filet lumineux ne disparut pas avec cette instantanéité qu'on observe dans l'occultation des étoiles; il disparut graduellement, et il nous fut bien difficile d'évaluer la fraction de seconde. Au moment où je jugeai l'occultation complète, j'enlevai le verre coloré, mais il restait encore un filet de lumière si vif, que j'en fus un instant ébloui. Il disparut cependant assez vite pour que je pusse continuer mon observation, et je le vis se transformer peu à peu en un arc de lumière rose terminé par une infinité de pointes. Celles-ci furent éclipsées à leur tour au bout de *six secondes*, et alors parurent les protubérances ou flammes rouges.

Ces détails de notre observation sont conformes à ceux qui ont été donnés antérieurement par M. Airy, et plus tard par le P. Cappelletti et M Stephan. M. Airy, en 1842, était accompagné d'un observateur qui regardait à l'œil nu, et qui était chargé de l'avertir du

moment où le Soleil serait sur le point de disparaître. Mais, lorsqu'on lui donna le signal dont on était convenu, il avait déjà noté l'instant de la disparition; aussi, ayant enlevé le verre noir de la lunette, il fut frappé par un vif rayon de lumière. MM. Stephan et Tisserand virent quelque chose de semblable dans l'observation qu'ils firent aux Indes en 1868. Voici comment ils s'expriment : « Le deuxième contact ne fut pas suivi d'une disparition brusque de toute lumière vive. Après la disparition du bord du Soleil, la Lune nous parut encore comme bordée d'un contour lumineux peu épais, d'un quart de minute environ, d'un éclat presque comparable à celui du Soleil. Cet anneau est tellement brillant qu'il peut induire en erreur sur l'existence véritable du contact »

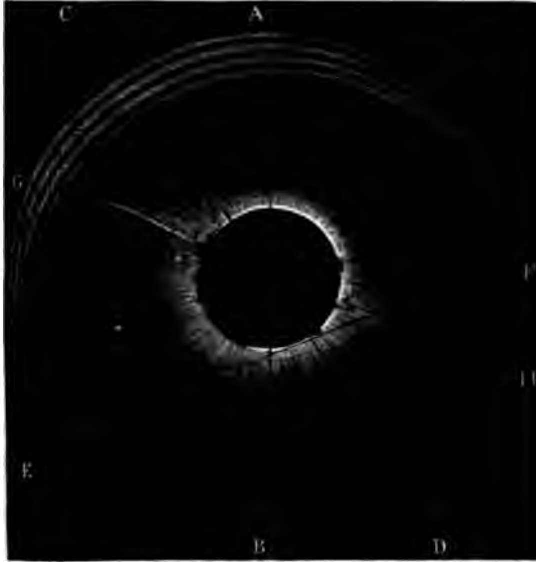
Le P. Cappelletti dit à son tour, à propos de l'éclipse qu'il observa au Chili, le 25 avril 1865 : « Pendant la totalité, la Lune était entourée d'un anneau (anillo) d'un quart de minute environ; autour de cet anneau se trouvait la couronne » (*fig.* 66).

Cet anneau a été également signalé à Mantawalok. Nous pourrions ajouter d'autres témoignages, mais ceux que nous venons de citer suffisent pour montrer qu'il y a entre la photosphère et les protubérances une couche très-brillante que nous retrouverons également dans les photographies.

Comme cette couche brillante est bordée de lumière rose, il est évident que, dans la comparaison des observations, on ne peut pas faire abstraction de la teinte du verre coloré qu'on emploie. Pour nous en assurer, nous avons mesuré le diamètre du Soleil en employant successivement un verre bleu et un verre rouge, et

nous avons trouvé une différence de deux secondes environ.

Fig. 66.



De tout ce que nous venons dire, il résulte que le Soleil n'est pas limité par un contour géométrique nettement défini; sur ses bords il y a une région où la lumière s'éteint rapidement, mais graduellement, et cette région a une étendue de quelques secondes.

A la réapparition du Soleil, les phénomènes se reproduisent en sens inverse, mais quelques-uns d'entre eux sont alors plus faciles à saisir, l'œil n'étant plus, comme au commencement, ébloui par la lumière. Par exemple, on distingue plus nettement le bord dentelé de couleur rose qui environne tout le disque; on peut même continuer à voir les protubérances et la cou-

ronne quelques instants après la réapparition du Soleil. En 1860, M. de la Rue put voir une protubérance avant la totalité, en regardant le Soleil par réflexion sur une glace non étamée : M. Bruhns en vit une deux minutes après l'apparition.

Nous parlerons plus tard de la nature des protubérances; qu'il nous suffise, pour le moment, de signaler une illusion d'optique qui s'est produite assez souvent et dans laquelle l'imagination joue un grand rôle. Comme le mouvement de la Lune dévoile successivement chacune de ces flammes, plusieurs observateurs ont cru qu'elles se formaient en effet sous leurs yeux. Nous savons maintenant que les protubérances existent indépendamment de l'éclipse, l'obscurité ne fait que les rendre visibles.

Un peu avant la fin de la totalité, la couronne devient généralement plus vive dans la partie du Soleil qui est sur le point de reparaître, et on voit se former un arc rose d'un étendue considérable, embrassant à peu près un sixième du contour solaire. Schumacher le vit avec une étendue de 90 degrés; le P. Cappelletti n'en vit qu'une longueur de 50 à 60 degrés. Cette étendue dépend de la différence des diamètres apparents de la Lune et du Soleil; lorsqu'on la connaît on peut calculer la hauteur de la couche rose, et c'est ainsi qu'on l'a évaluée à 15 ou 20 secondes. En Espagne, cet arc occupait une étendue de 60 degrés. Comme j'observais sans verre coloré, il arriva un moment où la lumière devint trop vive; je retirai l'œil de la lunette, et en ce moment même le Soleil apparut. Il brillait au milieu du ciel comme une lampe électrique; la couronne fut encore visible pendant

vingt-cinq secondes, et même, en cachant avec la main la partie brillante, je pus la distinguer pendant quarante-cinq secondes (1). Les ombres étaient parfaitement tranchées, mais vacillantes.

Il importe de remarquer qu'avant la réapparition du Soleil, l'éclat de la lumière m'obligea de retirer l'œil de la lunette. Ce fait et une foule d'autres observations montrent qu'à la fin, comme au commencement, on remarque une gradation rapide, mais sensible, de la lumière entre la couche rose et la photosphère.

Beaucoup d'observateurs ont remarqué de grandes oscillations au bord du Soleil, au moment de sa réapparition. Le P. Cappelletti dit qu'elles lui rappelaient les vagues de l'Océan au cap Horn. Il est bien difficile de savoir si la cause de ce phénomène se trouve dans notre atmosphère ou dans celle du Soleil. L'atmosphère terrestre peut y contribuer beaucoup par une agitation due au refroidissement anormal qu'elle vient de subir. Ce refroidissement occasionne souvent des brouillards, des nuages, quelquefois même des halos, comme on l'a observé au Chili (*fig.* 66).

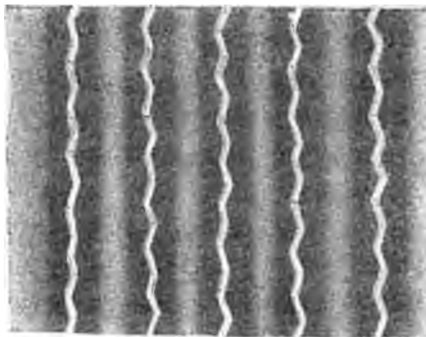
L'apparition du Soleil est accompagnée d'ombres vacillantes et de franges lumineuses qui paraissent traverser l'horizon. Cette observation a été faite dans beaucoup d'éclipses, mais surtout en 1842 et en 1860. Tout dernièrement, le P. Faura, à Mantawalok, a cherché à représenter le phénomène par le dessin

---

(1) Ces données pourraient servir à évaluer le pouvoir éclairant de la couronne; car au moment où elle disparaît, son intensité lumineuse est égale à celle du faisceau de rayons qui part du Soleil.

que nous reproduisons dans la *fig.* 67. Mais il faut remarquer que ces lignes serpentantes n'ont pas la régularité qu'on a été obligé de leur donner.

Fig. 67.



Pour faire cette observation, le P. Faura avait étendu sur le sol une grande feuille de papier blanc sur laquelle se détachaient les lignes ondulées qu'il a essayé de reproduire. On ne connaît pas encore l'explication de ces bandes, mais nous les attribuerions volontiers à l'agitation que nous avons signalée tout à l'heure dans le croissant solaire lui-même. Quelquefois elles paraissent irisées, et je serais disposé à les comparer avec l'apparence que présentent les grandes étoiles lorsqu'on les observe avec un spectroscope simple à une petite hauteur au-dessus de l'horizon. On voit alors des espèces de vagues noires courir à travers le spectre, dans des directions plus ou moins inclinées, et qui font varier l'intensité des couleurs sans changer la position de l'étoile ni celles des raies. Ce phénomène se rattacherait donc à celui de la scintillation; la partie visible du Soleil, étant

très-étroite, se comporterait alors à la manière des étoiles. C'est là une de ces circonstances qu'on a peu étudiées, et sur lesquelles on fera bien d'attirer l'attention des observateurs.

§ IV. — *De la couronne.*

Lorsqu'on observe une éclipse à l'œil nu, le phénomène le plus remarquable est celui de la couronne. Les anciens observateurs la mentionnent toujours comme un phénomène extraordinaire et constatant avec certitude l'existence d'une atmosphère lunaire; mais nous sommes certains maintenant qu'il faut en chercher la cause dans le Soleil lui-même.

L'observation la plus ancienne où l'on trouve ce phénomène décrit avec quelques détails remonte à l'année 1239; elle est citée par Muratori (*Ann. Re. Ital.*, t. XIV, col. 1097). Le chroniqueur dit qu'on vit un cercle autour du Soleil, avec un trou enflammé dans la partie inférieure (1). Il s'agit sans doute d'une protubérance. Clavius l'observa aussi à Coïmbre le 21 août 1560, et il en parle avec surprise.

La première description faite d'une manière scientifique est due à Wassenius, qui observa le 2 mai 1733; il remarqua en même temps les protubérances et les regarda comme des nuages flottant dans l'atmosphère de la Lune. A partir de cette époque, tous les observateurs sont d'accord dans leurs descriptions. C'est toujours une auréole formée de rayons divergents; ces

---

(1) Quoddam foramen erat ignitum in circulo Solis ex parte inferiori.

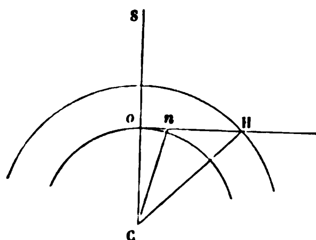
rayons partent d'un anneau qui environne la Lune, dont l'éclat très-vif, d'un blanc argentin ou nacré, s'étend à une distance variable avec les circonstances atmosphériques, mais ordinairement égale au diamètre lunaire.

On a essayé d'évaluer l'intensité lumineuse de la couronne, mais les résultats obtenus sont très-différents les uns des autres. C'est qu'en effet il est bien difficile de faire une semblable évaluation, à cause des variations extraordinaires et exceptionnelles que présente la lumière dans une éclipse. Ce qui est certain, comme nous l'avons déjà noté, c'est qu'en 1860 nous avons pu distinguer la couronne quarante secondes après la réapparition du Soleil. On peut même, sinon la voir, au moins constater son existence pendant un temps beaucoup plus considérable, six ou sept minutes environ avant et après la totalité. En effet, si l'on projette sur un écran l'image du Soleil, on voit qu'en dehors du disque solaire, on distingue encore nettement la silhouette de la Lune jusqu'à une distance considérable. Cela tient à ce que le disque lunaire tranche par son obscurité complète sur le contour du Soleil où se développe l'auréole.

D'après notre évaluation, le pouvoir éclairant de la couronne ne doit pas être inférieur à celui que possède la pleine Lune dans les circonstances les plus favorables. En effet, la Lune permet de voir les étoiles de première et même de seconde grandeur, tandis que pendant les éclipses on distingue à peine les plus brillantes. Ce qui fait alors paraître les ténèbres si affreuses, c'est la rapidité avec laquelle elles se produisent.

Cependant il ne faut pas oublier que, pendant les éclipses totales, nous sommes éclairés, non-seulement par la couronne, mais encore par la partie de l'atmosphère terrestre qui n'est pas actuellement dans la totalité. Supposons que le Soleil soit au zénith au point S (*fig.* 68), *o* étant la position de l'observateur. Menons une horizontale qui rencontrera en H les limites de l'atmosphère; le rayon de *on* l'ombre lunaire, vu du centre C de la Terre, ne sous-tend guère qu'un angle de 1 degré, même dans une éclipse de six minutes de durée, tandis que la longueur *o*H sous-tend au moins 7 degrés. Donc, au point *o*, l'observateur sera éclairé par la partie de l'atmosphère située de *n* en H. Mais cette lumière sera nécessairement très-faible, car elle provient d'une partie assez restreinte du Soleil, et en second lieu elle tombe sur une région élevée, et par conséquent raréfiée, de l'atmosphère. De là cette coloration jaune que présente l'horizon; c'est qu'il est éclairé seulement par les bords du Soleil dont la teinte, ainsi que nous l'avons vu dans le Chapitre précédent, est d'un jaune fuligineux.

Fig. 68.



L'éclat de la couronne dépend beaucoup de l'état du ciel. Sous le beau ciel des Indes, pendant la der-

niere éclipse, sa lumière était très-belle, et à sa clarté on pouvait facilement lire des caractères de moyenne grandeur. En 1842, pendant que Baily observait à Pavie une couronne très-brillante, M. Airy la voyait très-pâle à Turin, où le ciel était brumeux. En 1851, à Gottembourg en Suède, elle était très-belle, tandis qu'à Lilla-Edet, en Suède également, elle était faible et peu étendue.

A part ces différences, elle est toujours composée de la même manière, et on y distingue trois parties bien définies, quoique les lignes de séparation ne soient pas nettement tranchées. La première est une zone très-vive, ayant 3 ou 4 minutes de largeur, possédant la couleur et l'éclat de l'argent. Autour se trouve une zone dont la lumière présente une gradation très-rapide, et dont le bord extérieur se confond avec le ciel. Enfin, de la première zone partent un certain nombre d'aigrettes lumineuses, composées de lignes brillantes entrelacées, et dont la longueur, variable suivant les circonstances, atteint quelquefois le double du diamètre de la Lune.

La *fig.* 69 montre l'aspect de la couronne telle que nous l'avons observée au *Desierto de las palmas*, en 1860; mais cet aspect est loin d'être constant dans une même éclipse, et il varie beaucoup plus encore d'une éclipse à l'autre. Il suffit, pour s'en convaincre, de comparer ce dessin avec celui de Baily et celui du P. Cappelletti, et nous en verrons d'ailleurs d'autres exemples.

La partie la plus vive de la couronne se trouve immédiatement en contact avec la photosphère, et la matière rose paraît être en suspension dans cette

couche elle-même. Son éclat est tellement vif, qu'il peut occasionner des doutes sur l'instant précis de la

Fig. 69.



totalité (Cappelletti, Stephan, Tisserand, etc.). Lorsque les circonstances atmosphériques sont favorables, cet anneau, quoique très-affaibli, possède encore un

éclat remarquable. On peut évaluer sa largeur à 15 ou 20 secondes. Autour de cette première couche, et en contact immédiat avec elle, se trouve une autre région, où la lumière est encore assez vive, dans laquelle se produisent les protubérances, et qui s'étend jusqu'à une distance de 4 ou 5 minutes. Elle est d'un blanc d'argent, et tellement brillante, qu'elle présente un aspect nacré. Quelques observateurs parlent de *couches* de lumière, mais cette expression n'est pas exacte, car l'intensité lumineuse diminue par gradation insensible, sans qu'on puisse assigner de limite précise entre les différentes couches.

La couronne est parfaitement concentrique au Soleil; les apparences qu'elle présente pendant l'éclipse ne permettent pas d'en douter, car elle est beaucoup plus brillante dans la partie où le Soleil est plus voisin du bord lunaire. On ne peut donc plus l'attribuer à l'atmosphère de la Lune, et il faut nécessairement la regarder comme appartenant au Soleil.

Elle n'est cependant pas uniforme dans toutes les parties de son contour, comme on pourrait le croire au premier abord. Plusieurs observateurs ont déjà fait cette remarque, et surtout Gillis, en Amérique, où il étudia l'éclipse de 1858. Les parties les plus vives correspondent en général au voisinage des protubérances et à la base des aigrettes. Mais on ne peut pas beaucoup compter sur les observations optiques pour apprécier ces différences : d'abord, il est toujours difficile d'apprécier l'intensité d'une lumière dans ces circonstances, surtout lorsqu'il n'y a pas de contour nettement tranché; en second lieu, ces observations sont faites à la hâte, les savants étant occupés à des

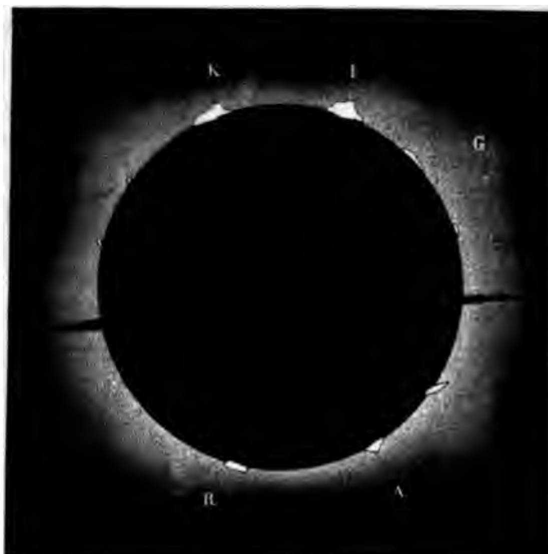
choses bien plus importantes; souvent même les dessins sont faits grossièrement de mémoire, lorsque l'éclipse est terminée. Le seul moyen d'avoir des mesures exactes, c'est la photographie. Nous avons employé cette méthode au *Desierto*, et nous reproduisons ici (*fig*. 70) l'épreuve que nous avons obtenue. La seule inspection de la figure montre que la lumière est inégalement distribuée dans les différentes parties de la couronne, et que son étendue est beaucoup plus grande dans le sens de l'équateur. Cette remarque importante est confirmée par les épreuves photographiques obtenues aux Indes en 1868 par le major Tennant et par celles des Américains en 1869.

L'emploi de la photographie peut aussi faire connaître la variation qu'éprouve la lumière à mesure qu'on s'écarte du Soleil. Ainsi, une exposition de six secondes nous donne une trace à peine sensible de la couronne; avec douze secondes, le résultat était meilleur; et en trente secondes, nous avons obtenu l'épreuve reproduite ci-contre (*fig*. 70). Le contour irrégulier est assez remarquable. La partie plus étroite appartient à la direction des pôles solaires; la ligne sombre XY est l'ombre d'un fil tendu dans la lunette. Les astronomes américains de *Harmand College* ont obtenu dernièrement un résultat semblable. Nous reviendrons sur ce sujet intéressant.

La lumière de la couronne est-elle directe ou réfléchie? Cette question ne peut être résolue que par l'analyse polariscopique. En 1860, M. Prazmowski la trouva polarisée, ainsi que le capitaine Braunfield et sir John Herschel en 1868; on a même déterminé le plan de polarisation, qui passe par le centre du Soleil

et le point observé. De ces résultats il faudrait conclure que la lumière de la couronne est réfléchie.

Fig. 70.



Nous-même, au *Desierto*, nous observâmes des traces de polarisation Mais les observateurs français ayant obtenu un résultat différent, il faudrait, pour avoir quelque certitude, discuter les circonstances de leurs observations et la nature des instruments qu'ils ont employés.

En 1868, à Aden, M. Rziha observa le spectre de la couronne et le trouva parfaitement continu, malgré toutes les précautions qu'il prit pour obtenir les raies, s'il avait dû s'en produire. MM. Janssen et Tennant sont arrivés au même résultat. Il faudrait en conclure

que la matière qui compose la couronne est à une température très-élevée, mais qu'elle n'est pas encore en dissociation. Cependant M. Young croit avoir observé, au mois d'août 1869, dans le voisinage de E, une raie brillante qui lui semble coïncider avec celle qu'on a remarquée dans les rayons brillants de l'aurore boréale. Ces divergences demandent de nouvelles observations.

En résumé : l'auréole est formée par l'atmosphère du Soleil, et non par celle de la Lune; elle s'étend très-loin, en diminuant rapidement d'intensité à partir d'une distance égale au quart du rayon solaire. Mais tous ces phénomènes dépendent de deux causes qui sont difficiles à apprécier : l'état de notre atmosphère, et les circonstances qui produisent les aigrettes.

§ V. — *Des aigrettes.*

Les observateurs sont peu d'accord pour fixer les limites de la couronne, mais ils le sont encore bien moins par rapport aux rayons qui s'en échappent et se prolongent souvent à des distances considérables. Les descriptions diffèrent d'une éclipse à l'autre, et, pour une même éclipse, il semble que le phénomène ait été différent suivant la station d'où il a été observé. Comme cette question est intéressante, nous l'examinerons avec soin, afin d'engager les astronomes à l'étudier attentivement dans les prochaines éclipses.

Dans les observations anciennes, on s'est borné à nous indiquer l'existence des rayons divergents, en évaluant grossièrement leur étendue. En 1842, les descriptions furent détaillées, mais encore assez défec-

tueuses. A Turin et à Pavie, Airy et Baily ne font aucune mention de ce phénomène. A Milan, Picozzi et Magrini aperçurent deux faisceaux de rayons. Dans la France occidentale, on signala également deux faisceaux opposés. Arago vit près du point culminant de la Lune une large tache lumineuse formée de jets entre-croisés qu'il comparait à un écheveau de fils entrelacés. Peytal les comparait à un paquet de chanvre. D'autres observateurs remarquèrent que le prolongement de ces rayons ne passait point par le centre du Soleil, ni par celui de la Lune, et que plusieurs étaient recourbés. A Toulon, on distingua trois faisceaux; les deux principaux étaient sur la ligne d'entrée et de sortie de la Lune. Petit en vit également trois, ainsi que Struve, qui leur assigna une longueur de 1°,5.

On le voit, ces relations sont confuses et contradictoires. Nous retrouvons la même incertitude pour l'éclipse de 1851, et pour les suivantes. En 1860 nous n'observâmes ce phénomène que très-rapidement, vers le milieu de l'éclipse. Les aigrettes, dont nous avons donné le dessin, nous parurent tranquilles comme les rayons qu'on voit entre les nuages au coucher du Soleil. M. Cepeda, qui observait près de nous, vit un rayon ramifié comme un bois de cerf. M. Fielitzch, à Castellon de la Plana, non loin du *Desierto*, vit deux jets lumineux qu'il comparait aux branches d'une lyre. M. Struve, à Pobes, vit cinq rayons bien tranchés, l'un d'eux était recourbé en forme de crochet. Le 29 août 1867, M. Grosch vit deux grandes masses de rayons dans la direction de l'équateur solaire, et une double aigrette renversée près du pôle.

En 1868, on vit aux Indes de grandes irrégularités

dans la couronne, mais nous manquons de détails précis. La *fig.* 71 a été dessinée par le capitaine Bul-

Fig. 71.



lock, qui conduisit à Mantawalok les professeurs du collége de Manille. On y remarque surtout un rayon transversal, qui parut seulement deux minutes après la totalité, et persista jusqu'à la fin. Sa direction est

oblique par rapport aux autres rayons qui parurent dès le commencement. Ce dessin se recommande par sa grande exactitude, car il a été contrôlé par d'autres dessins exécutés à la chambre noire. On n'a jamais réussi à photographier les aigrettes; c'est pour suppléer à cette impuissance de la photographie que les professeurs de Manille ont imaginé le procédé suivant. Ils préparaient d'avance des feuilles sur lesquelles étaient esquissées l'éclipse et l'auréole; de cette manière, en introduisant ces feuilles dans la chambre noire, on pouvait en fort peu de temps tracer avec exactitude les figures correspondant aux différentes phases.

Nous devons rappeler ici le dessin curieux que le P. Cappelletti exécuta au Chili en 1865 (*fig.* 66, p. 155). Le rayon principal était loin d'avoir une forme symétrique et il différait complétement des autres. Sa lumière était blanche et très-vive; l'un de ses bords était nettement terminé, tandis que l'autre était diffus et allait en s'évanouissant progressivement. Enfin, le P. Cappelletti fait observer que ce rayon si remarquable correspondait à la principale protubérance.

Tels sont, en résumé, les renseignements que nous possédons sur ces curieux appendices. Quelle est leur cause? faut-il la chercher dans le Soleil, dans la Lune, ou dans notre atmosphère? Après un long examen, nous sommes convaincu que leur cause première est dans le Soleil, mais que leurs apparences peuvent être notablement modifiées par la présence de la Lune et par les circonstances atmosphériques.

Afin de nous faire comprendre plus facilement, nous rappellerons une expérience très-facile à répéter, et que nous avons faite à l'occasion de l'éclipse d'Es-

pagne. Qu'on fasse au volet d'une chambre obscure un trou grossièrement arrondi, dont les bords aient des dentelures; qu'on le ferme imparfaitement à l'aide d'un bouchon, et qu'on fasse passer à travers les interstices un faisceau de rayons solaires. En regardant de côté, on verra une série de rayons parallèles; mais si l'on place l'œil sur l'axe même du faisceau, on verra une couronne de rayons divergents s'étendant à une grande distance des trous. L'expérience réussirait également si l'on fermait un trou parfaitement rond avec un bouchon échancré sur son contour. Cette apparence est un simple effet de perspective, analogue à celui qui produit les rayons que l'on observe entre les nuages auprès du Soleil couchant. Cette expérience nous montre qu'une échancrure très-petite peut donner naissance à un rayon d'une très-grande longueur; cette longueur serait encore bien plus grande si l'air était rempli de poussière ou de fumée d'encens.

Appliquons ces résultats aux phénomènes qui se produisent pendant les éclipses. Le Soleil peut donner naissance à des rayons semblables, soit par ses protubérances, soit par les parties les plus brillantes de la couronne qui agiront autour de la Lune comme les échancrures du volet agissent autour du bouchon. Mais on se tromperait complétement si l'on jugeait des dimensions de la masse lumineuse qui produit ce phénomène, par l'étendue du rayon qu'on aperçoit. Cette étendue dépend beaucoup du pouvoir réflecteur de l'atmosphère, et surtout de la position de l'observateur. Une masse lumineuse dépassant le contour de la Lune de quelques secondes seulement peut, selon l'éclat qu'elle possède, éclairer l'atmosphère terrestre

à une profondeur considérable, et cette *profondeur* se traduira par une *longueur* proportionnelle du rayon visible. La Lune elle-même, avec son profil dentelé, contribuera à la production du phénomène en laissant passer des faisceaux lumineux plus ou moins larges, plus ou moins nettement terminés. La forme des rayons dépendra surtout de la position de l'observateur; les effets de parallaxe auront une influence très-considérable, et à quelques kilomètres de distance on pourra voir la couronne et ses rayons sous des aspects très-différents.

Enfin l'atmosphère terrestre ne sera pas susceptible d'être également éclairée dans tous ses points, car en certains endroits elle est plus transparente, en d'autres elle est plus chargée de vapeurs; de là résulteront des lignes capricieuses produisant un effet analogue à celui des rayons lumineux qui traversent une chambre obscure, lorsqu'on soulève de la poussière sur leur passage.

Telles sont les idées générales qu'il faut maintenant contrôler par l'observation, afin de voir jusqu'à quel point elles sont exactes et applicables au sujet qui nous occupe.

Si nous examinons les dessins donnés par les différents observateurs, nous trouverons qu'ils s'accordent le plus souvent à donner aux rayons la direction des principales protubérances, surtout dans la région de l'équateur et dans celles des taches. Le P. Cappelletti a fait cette remarque, et elle est assez bien vérifiée par les dessins de Mœsta en 1853, de Gillis en 1855, et par les nôtres mêmes, quoique nous ne prétendions pas à une très-grande exactitude.

Cette coïncidence est parfaite dans les dessins de Bullock.

En 1860, M. Plantamour observa la couronne et la dessina trois fois : au commencement, au milieu et à la fin. Dans le premier dessin, outre la couronne, il a tracé trois faisceaux de rayons correspondant aux protubérances dans la région d'entrée ; dans le second il y a cinq faisceaux, deux à l'est, trois à l'ouest ; enfin dans la troisième, il y a également cinq faisceaux, mais ils se trouvent tous dans la région de sortie, et correspondent aux nombreuses protubérances qui parurent dans cette région à la fin de l'éclipse.

Cette observation est d'accord avec celle de Mantawalok, où le capitaine Bullock vit, deux minutes après la totalité, se former un rayon oblique dirigé vers l'une des protubérances. D'autres observateurs, entre autres Pope Hennesey, assurent que ces rayons paraissaient animés d'un mouvement facile à constater. Ce mouvement apparent s'explique aisément si l'on se rappelle que la Lune, en changeant de position d'un instant à l'autre, fait également varier la position des parties éclairantes par rapport à l'observateur.

Reste à expliquer la forme courbe que possèdent les rayons. On peut encore faire une large part à notre atmosphère, en admettant, comme nous l'avons déjà dit, que ces courbes dépendent de la manière dont la vapeur est distribuée dans l'air. Cette explication, que nous avons proposée jadis, ne laisse pas que d'être plausible ; cependant elle n'est pas complétement satisfaisante. Nous avons été convaincu de son insuffisance par un phénomène dont l'observation est due à M. Tacchini. Ce savant astronome voyageait sur

la Méditerranée, à bord d'un bateau à vapeur, et il observait le coucher du Soleil, le 8 août 1865. Il s'aperçut que le disque solaire était comme surmonté de deux aigrettes lumineuses, pareilles à deux boucles de cheveux renversées en sens opposé (*fig.* 72). Leur

Fig. 72.



hauteur au-dessus du disque était tout au plus égale aux $\frac{7}{10}$ du disque lui-même. Enfin ces appendices suivaient assez bien le mouvement du Soleil, et ils s'enfoncèrent comme lui au-dessous de l'horizon.

M. Tacchini nous donna avis de cette observation, et immédiatement nous compulsâmes le registre où sont inscrites les observations que nous faisons régulièrement sur les taches solaires. Nous trouvâmes que le même jour il y avait sur le bord du disque une tache accompagnée d'une grande facule ayant à peu près la forme décrite par M. Tacchini (*fig.* 73); aussi n'avons-nous pas hésité à admettre que l'aigrette observée par lui pourrait bien être produite par une de ces masses lumineuses qui constituent les facules, et deviennent visibles dans les éclipses.

Une nouvelle observation est venue confirmer cette

idée. M. Grosch, au Chili, pendant l'éclipse totale du 29 août 1867, a observé un faisceau de rayons

Fig. 73.



courbes tout à fait semblable à celui qui a été dessiné par M. Tacchini. (Voir *Bulletin météorologique du Collége Romain*, 1867, p. 87.)

Tout dernièrement, un voyageur nous a assuré que, sur la fin du mois de février 1869, il a vu à Pœstum le Soleil se lever avec une aigrette analogue à celles qu'il présente dans les éclipses. Les photographies américaines de 1869 montrent des traces de courbure dans les faisceaux de la couronne, et appuient ces conjectures.

Il est donc bien possible que ces faisceaux recourbés qu'on observe quelquefois aient leur cause unique dans le Soleil. Cependant les faits constatés jusqu'à présent ne suffisent pas pour rendre cette opinion parfaitement certaine; ils doivent seulement donner une direction dans les nouvelles recherches qu'il faudra faire à ce sujet.

Les rayons obliques seraient produits par des faisceaux lumineux lancés dans cette direction même. On a objecté qu'il est impossible d'admettre que la longueur réelle de ces faisceaux soit égale à $\frac{1}{4}$ du rayon solaire. Nous savons, en effet, que plusieurs comètes ont passé si près du Soleil, au moment de leur périhélie, qu'elles auraient dû rencontrer ces rayons, s'ils avaient une aussi grande étendue; le mouvement de ces astres aurait donc dû éprouver, dans ce milieu nécessairement résistant, un ralentissement qui n'a jamais été constaté.

Il est assez facile de répondre à cette objection. Quelques comètes ont dû traverser non-seulement les rayons, mais la couronne elle-même. En passant ainsi à travers l'atmosphère solaire, elles ont pu se volatiliser en partie et s'échapper ensuite, comme font les bolides et les étoiles filantes dans l'atmosphère terrestre. Pour démontrer que les choses n'ont pu se passer ainsi, il faudrait connaître la partie de l'orbite qui précède le périhélie, et il nous est impossible de la connaître d'une manière suffisante. Cependant, il faut avouer que notre atmosphère joue dans la production des aigrettes un rôle incontestable, quoique secondaire.

Signalons encore une idée qui n'est pas sans importance. La science moderne a constaté qu'il existe des amas de matière cosmique, analogues aux nébuleuses, circulant comme les comètes dans l'intérieur du système solaire, et qui, au moment de leur périhélie, se trouvent très-voisines du Soleil.

Cette circonstance n'est peut-être pas étrangère à certaines apparences extraordinaires qui se présentent

pendant les éclipses. Ne serait-ce point à quelqu'une de ces masses cosmiques, fortement éclairée par les rayons solaires, qu'il faudrait attribuer ces rayons et ces arcs recourbés. Le temps pourra seul faire connaître la valeur de ces idées, qui ne sont en ce moment que de simples conjectures.



CHAPITRE VII.

DES PROTUBÉRANCES OU PROÉMINENCES ROSES QU'ON OBSERVE PENDANT LES ÉCLIPSES TOTALES DU SOLEIL.

§ I. — *Premières observations des protubérances.*

Ce fut pendant l'éclipse du 8 juillet 1842, que l'attention des astronomes fut attirée par ces protubérances, qui s'élancent autour de la Lune comme des flammes gigantesques, de couleur rose ou fleur de pêcher. La surprise que leur causa ce phénomène inattendu ne leur permit pas de faire des observations précises, de sorte qu'il y eut un désaccord complet entre les différentes relations. Baily remarqua trois proéminences très-vastes, presque uniformément réparties du même côté (*fig.* 60, p. 146). Airy en observa trois en forme de dents de scie, mais placées au sommet (*fig.* 74). Arago en vit deux à la partie inférieure du

Fig. 74.



Fig. 75.



disque (*fig.* 75). Struve et Schidlofschi remarquèrent les mêmes qu'Arago, et de plus ils notèrent une bande rose embrassant un arc de 45 degrés environ. A Vérone, ces flammes demeurèrent visibles quelque temps après l'apparition du Soleil.

Ces appendices avaient des dimensions considérables. Petit mesura une hauteur et la trouva égale à 1′45″, ce qui équivaut presque à 6 diamètres terrestres, c'est-à-dire à 80 000 kilomètres. Les appréciations des autres observateurs variaient entre 1 minute et 2 secondes.

La discussion s'ouvrit aussitôt sur la nature de ces protubérances. On les prit d'abord pour des montagnes; mais cette opinion était inconciliable avec les observations d'Arago, quelques-unes de ces prétendues montagnes étant très-inclinées, surplombant même assez fortement pour que l'équilibre fût impossible. La plupart des savants les regardèrent comme des flammes, ou comme des nuages. Quelques-uns, se fondant sur le peu d'accord qui régnait entre les observateurs, déclarèrent que c'étaient de pures illusions d'optique, des effets de mirage produits à la surface de la Lune; telle était l'opinion de Faye, de Marquez, de Felitzch. Il était donc indispensable de faire des observations ultérieures, de surveiller avec soin les éclipses suivantes, et de recourir aux observations passées.

En réalité, ces phénomènes n'étaient pas nouveaux, mais, comme il arrive souvent pour les choses extraordinaires dont nous n'avons aucune idée, on n'avait rien compris aux récits d'ailleurs inexacts et exagérés des observateurs. Ils avaient parlé d'échancrures vues

dans le disque lunaire, de flammes, d'éclairs, de nuages et d'orages vus dans l'atmosphère de la Lune. Cette apparence d'échancrure notée par quelques observateurs est due à un phénomène d'irradiation; elle se produit facilement lorsqu'on observe à l'œil nu ou avec un faible grossissement, comme on l'a encore remarqué dans la dernière éclipse. (Hennessy, Ray; 1868.)

De toutes les observations anciennes, la plus détaillée est celle que Wassénius fit à Gothenbourg, le 2 mai 1733. Dans la couronne, qu'il attribue à l'atmosphère de la Lune, il crut voir flotter plusieurs nuages rouges; l'un deux paraissait plus grand que les autres, et semblait composé de trois masses superposées, *complétement séparées du disque lunaire*. (*Philos. Transac.*, t. XXXVIII, p. 135; et *Astr. Nach.*, n° 463.) La *fig*. 76, montre bien que ce sont des nuages; mais

Fig. 76.

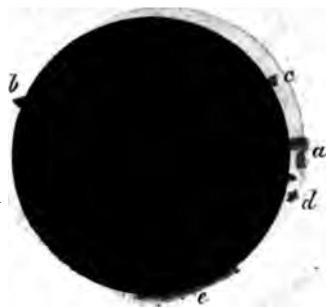


il reste à savoir s'ils appartiennent réellement à la Lune ou s'ils ne dépendent pas du Soleil.

On attendait avec impatience l'éclipse de 1851 qui devait être totale en Suède. M. Airy organisa une expédition, et prépara des instruments destinés à prendre des mesures précises. Au moment de la totalité, il observa d'abord une protubérance *a* (*fig*.77) ayant la forme d'une équerre terminée en pointe; au-dessous

se trouvait un petit cône, et plus loin, au point *d*, un petit nuage suspendu *d*. Un peu plus tard il distingua

Fig. 77.



une pointe *c*; puis au bout d'une minute la protubérance *b* située à l'autre extrémité du diamètre; enfin parut en dernier lieu un arc rosé *e*. Les autres observateurs remarquèrent les mêmes phénomènes avec de légères différences de formes. La figure donnée par M. Carrington est presque identique; on y remarque seulement un léger nuage blanchâtre joignant la protubérance principale avec le nuage isolé *d*. Cependant la protubérance *a* n'a pas tout à fait la même forme dans les dessins exécutés par des observateurs très-éloignés les uns des autres. M. Hind a donné le dessin suivant (*fig.* 78). M. Dawes a donné une forme intermédiaire entre les deux, et de plus l'arc *c* (*fig.* 77) lui parut beaucoup plus étendu. M. Talbot, placé presque à la limite de la zone de totalité, vit ce même arc rose embrasser une étendue à peu près égale à une demi-circonférence.

Ces observations nous permettent de formuler avec certitude les conclusions suivantes : 1° les protubé-

rances ne sont pas des montagnes; cette hypothèse est inconciliable avec leurs formes; 2° on doit les re-

Fig. 78.



garder comme des masses gazeuses, dont la forme est assez analogue à celle de nos nuages; leurs courbures rappellent assez bien la fumée qui s'échappe de nos volcans; 3° la variété des formes attribuées à une même protubérance peut tenir à des variations réelles; mais elle peut résulter aussi du peu d'exactitude des dessins; 4° il y a une relation évidente entre ces protubérances et les arcs roses déjà observés en 1842, mais qu'on observa beaucoup mieux cette fois : on peut légitimement supposer que ces arcs forment la partie visible d'une couche continue qui enveloppe complétement le Soleil; 5° on voyait la grandeur des protubérances s'accroître du côté que quittait la Lune et diminuer du côté où elle s'avançait; donc c'est sur le Soleil que se trouve le siége du phénomène; 6° tous les observateurs n'ont pas vu le même nombre de protubérances; ils ne leur ont pas assigné exactement la même place. Cela tient à la rapidité du phénomène, dont la totalité dure si peu de temps, qu'il n'est pas possible

d'examiner le contour du disque avec l'attention qu'on y apporterait dans d'autres circonstances.

Ces résultats ne parurent pas suffisants à un certain nombre d'astronomes. Les mesures semblaient peu exactes, les descriptions peu concordantes ; aussi continua-t-on à regarder ces phénomènes comme des illusions d'optique et des effets d'interférence. Pour convaincre tout le monde, il fallait des témoignages irrécusables, des mesures d'une exactitude toute mécanique; la photographie pouvait seule répondre à ces exigences, et c'est pour cela qu'on y attacha tant d'importance en 1860.

A part ces doutes peu fondés, il restait encore à résoudre plusieurs questions importantes : 1° quelle est l'intensité lumineuse des protubérances? 2° quelle est leur couleur précise? 3° ont-elles quelque relation avec les taches et les facules? Pour répondre à ces questions, il faut avoir recours à des mesures très-exactes, mesures que la photographie peut seule exécuter en aussi peu de temps. Cependant, comme la photographie, surtout dans des circonstances aussi exceptionnelles, est un moyen de recherche capricieux et peu sûr, on eut soin de contrôler ses indications à l'aide d'instruments spéciaux permettant d'obtenir directement et rapidement des mesures suffisamment précises. Le champ de notre lunette fut muni de deux fils de platine très-fins, faisant entre eux un angle assez aigu pour qu'on pût évaluer les dimensions des protubérances sans faire usage de vis micrométrique. Pour prendre les angles de position, nous mîmes à l'oculaire une alidade portant une pointe et mobile devant un cercle de carton; la

pointe, pressée au moment convenable, laissait sur le carton une trace qu'on pouvait ensuite étudier à loisir pour en déduire l'angle de position.

Le succès fut complet, comme nous le verrons bientôt. Seulement, la photographie ne nous apprenant rien sur les couleurs, il fallut y suppléer par des observations directes. Mais tous les observateurs n'éprouvent pas en présence du même objet des impressions identiques; leurs yeux ne sont donc pas des instruments comparables. Cependant ils s'accordaient tous à dire que les protubérances étaient d'un rouge plus ou moins clair, mélangé d'un violet analogue à celui de la fleur de pêcher. On remarqua cependant que la protubérance recourbée de 1851 était blanche à sa base, et cette remarque s'applique également aux protubérances de 1860; le rose était la couleur dominante, mais sur les bords on voyait des nuages jaunes parfaitement marqués, la base étant blanche. M. de la Rue fit la même observation. Cet astronome avait préparé des étoffes de différentes couleurs, qui devaient servir de terme de comparaison; mais cette méthode ne put donner aucun résultat, faute de lumière pour éclairer les étoffes. On pourrait employer des flammes colorées ou, mieux encore, des tubes de Geissler éclairés par un courant électrique. Mais l'analyse spectrale a fait abandonner toutes ces méthodes.

§ II. — *Photographies obtenues en Espagne pendant l'éclipse de* 1860.

Deux expéditions furent organisées pour observer l'éclipse de 1860, la première par M. de la Rue, la

seconde par nous, avec la collaboration de M. Aguilar, astronome de l'Observatoire de Madrid, et de M. le professeur Monserrat, de Valence. M. de la Rue choisit Rivabellosa, près de l'Atlantique, tandis que nous avions pris position au *Desierto de las palmas*, auprès de la Méditerranée.

Nous avions tous les deux une grave difficulté à vaincre, car nous ignorions complétement le pouvoir photogénique que possède la lumière pendant les éclipses; nous ne savions donc pas s'il nous serait possible d'obtenir des épreuves en opérant avec la rapidité qu'exigeaient les circonstances. M. de la Rue avait adopté l'héliographe de Kew, et comme les images formées directement au foyer de l'objectif étaient très-petites, il préféra les agrandir avec l'oculaire. Nous préférâmes, au contraire, prendre l'image directe donnée par l'objectif de Cauchoix. Cette image ayant 25 millimètres de diamètre donnait déjà des résultats parfaitement visibles, et d'ailleurs il nous restait toujours la ressource de l'agrandir par l'un des procédés connus. Deux raisons nous portèrent à préférer cette méthode : 1° la faible intensité de la lumière, qui, en la supposant égale à celle de la pleine Lune, semblait devoir exiger une minute d'exposition si nous agrandissions l'image : en opérant sur l'image directe nous trouvions plus de sûreté; 2° cette méthode nous permettait de faire un plus grand nombre d'épreuves dans le même temps, et par conséquent de fixer un plus grand nombre de phases.

Le résultat a prouvé que les deux systèmes sont excellents et que chacun d'eux a ses avantages. On

distingue plus de détails dans les images agrandies, mais l'image directe fixe une plus grande étendue de la couronne.

Notre première plaque ne fut exposée que pendant six secondes, et cependant, outre les protubérances, elle montre une trace parfaitement sensible de la couronne. La deuxième fut exposée pendant vingt secondes environ, mais trois secousses imprimées à l'équatorial pendant ce temps ont produit autant d'images distinctes et séparées des protubérances; il faut en conclure qu'avec un objectif de 6 pouces, comme le nôtre, un temps très-court suffit pour la reproduction de ces appendices.

Un an après l'éclipse, nous avons, avec M. de la Rue lui-même, agrandi nos petites photographies, de manière à obtenir des épreuves ayant les mêmes dimensions que les siennes, et nous avons trouvé une identité parfaite dans les détails les plus délicats. La seule différence consistait en ce qu'à Rivabellosa les protubérances supérieures étaient plus hautes, tandis qu'elles étaient un peu plus petites au *Desierto;* le contraire avait lieu pour les protubérances de la partie inférieure. Ce phénomène était dû à une petite différence de parallaxe, les observateurs étant, l'un un peu au nord, l'autre un peu au sud de la ligne centrale de la totalité. (*Voir* les *Mémoires de l'Observatoire du Collége Romain*, 1863.)

Il suffira donc de décrire nos photographies et de les comparer avec celles du savant anglais. Nous reproduirons ici les trois plus importantes, la première, celle du milieu et la dernière.

La *fig.* 79 représente la première épreuve prise

Fig. 79.



immédiatement après le commencement de la totalité Elle contient sept protubérances principales :

A. Protubérance ayant deux sommets très-rapprochés et peu élevés. Dans les photographies de M. de la Rue, elle est à peine visible; on n'aperçoit que les deux sommets; cela tient, comme nous l'avons dit plus haut, à un effet de parallaxe.

C. Grande protubérance en forme de nuage, inclinée de 45 degrés, arrondie à sa base, pointue au sommet, possédant une structure héliçoïdale, comme le montre la figure agrandie de M. de la Rue.

E. Petits nuages très-déliés dont l'ensemble forme une corne recourbée, ayant une hauteur d'environ

2′40″. Cette protubérance, retrouvée à la loupe dans nos petites photographies, décida M. de la Rue à les agrandir pour les comparer aux siennes. Cette circonstance prouve la précision de nos clichés. Malheureusement, on fit circuler, immédiatement après l'éclipse, des épreuves sur papier assez défectueuses, ce qui nuisit beaucoup à nos photographies, dans l'esprit même des savants, jusqu'au moment où la reproduction, faite sous les yeux de M. de la Rue lui-même, vint justifier ce que nous avions avancé sur l'identité de nos résultats comparés aux siens.

H. Amas compliqué de petits nuages dont la partie inférieure forme une espèce de croix.

G. Amas énorme de matière brillante qui a solarisé les épreuves, de sorte que les détails intérieurs ont disparu. Sa forme arrondie prouve qu'elle n'était pas en contact immédiat avec le Soleil, mais suspendue dans son atmosphère. Vue dans la lunette, elle offrait parfaitement l'aspect d'une chaîne de montagnes, par les dentelures et les pointes jaunâtres qui la terminaient à son sommet. On peut remarquer que cette protubérance semble pénétrer dans le disque de la Lune et y former une entaille Cette apparence est due au mouvement même de la Lune pendant la durée de l'exposition de la plaque. La Lune, avançant dans la direction où se trouve la protubérance, ne pouvait détruire l'impression déjà produite par la partie brillante, tandis que sa présence empêchait l'action de la couronne qui n'est pas aussi rapide. Dans les photographies agrandies, on voit que les bords de la protubérance sont parfaitement tranchés, tandis que celui de la Lune reste indécis. Cette circon-

stance explique aussi un phénomène curieux qu'on a remarqué dans les photographies de M. de la Rue : les plaques ayant été exposées une minute, le mouvement de la Lune s'est fait sentir plus fortement; aussi son bord paraît-il double, et c'est à l'intérieur de son disque qu'on voit l'arc rosé dont nous avons parlé.

I. Flamme gigantesque, ou plutôt énorme cumulus, dans lequel on distinguait des nuances de jaune et de rouge.

K. Proéminence à deux sommets, dont l'un, plus délié et moins vif, se prolonge en forme de corne. Cette protubérance est plus petite dans nos photographies que dans celles de M. de la Rue, pour une cause analogue à celle qui a produit l'effet contraire au point A.

Dans toute la partie gauche on ne voit encore aucune protubérance.

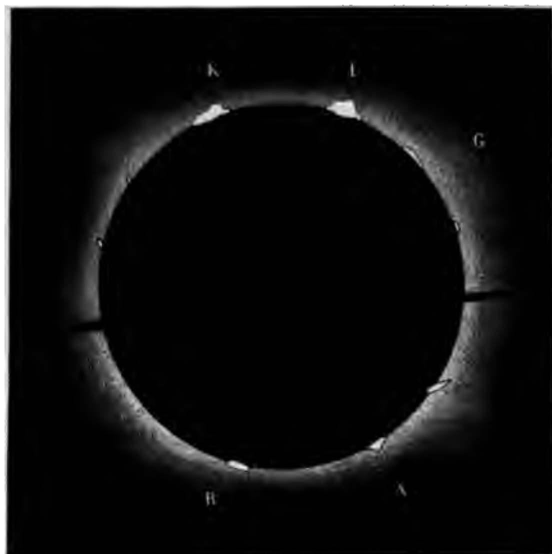
La ligne noire XY représente un fil tendu dans la lunette et dirigé suivant le parallèle céleste, afin de relever la position des protubérances par rapport à l'équateur solaire.

La seconde photographie avait d'abord été rejetée comme inutile, à cause des accidents qui avaient produit des impressions multiples; mais en réalité elle est très-précieuse; elle est une preuve évidente de la puissance actinique de ces flammes, car quelques-unes de ces impressions ont été produites en moins de trois secondes.

La troisième photographie (*fig.* 80) a demandé trente secondes d'exposition. Les protubérances commencent à montrer leurs sommets du côté gauche, et elles deviendront de plus en plus distinctes. Ce qu'il

y a de plus remarquable dans cette figure, c'est la couronne. Elle est très-irrégulière, mais on peut re-

Fig. 80.



marquer qu'elle présente une étendue plus considé- rable à droite et à gauche que dans les autres direc tions, c'est-à-dire qu'elle est plus développée dans l plan de l'équateur que suivant la ligne des pôles.

Les masses lumineuses ne sont pas uniformémе réparties; elles forment, pour ainsi dire, deux group les unes correspondant à l'équateur, les autres à région des taches; l'ensemble forme une figure à p près rectangulaire. En comparant cette auréole à position des protubérances, on reconnaît que la p grande diffusion lumineuse correspond à ces pro

nences; mais dans le voisinage des pôles, cette proportionnalité n'est pas gardée: l'auréole y présente un faible développement, tandis qu'on y voit des protubérances considérables. Ces remarques s'appliquent à toutes nos photographies, mais particulièrement à la quatrième, quoique la couronne y soit très-faible. Elles nous révèlent un fait capital qui n'avait été signalé dans aucune observation optique, et que les photographies de M. de la Rue n'avaient pas mis en évidence: c'est que l'atmosphère possède une forme généralement elliptique, sa plus grande intensité correspondant à la région des taches. Lorsque nous publiâmes ces résultats, les astronomes ne dissimulèrent pas leur peu de confiance. Mais actuellement nous avons reçu les photographies de M. Winlock, faites à Shelbysville, en Amérique, le 7 août 1869, par le même procédé que les nôtres, et nous trouvons que la couronne présente la même forme. Les parties polaires sont très-étroites; la région équatoriale et surtout celles des zones des taches sont très-dilatées. Il est donc évident que le contour de cette atmosphère n'est pas parallèle à la surface du corps solaire.

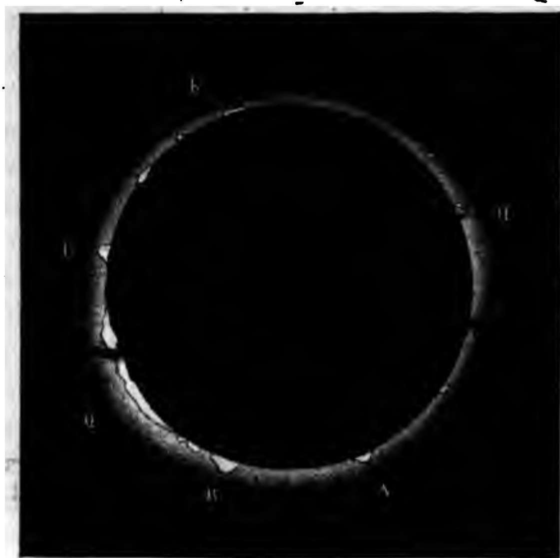
La dernière de nos photographies est représentée dans la *fig.* 81. A la suite du point K, on rencontre une petite proéminence, et entre les deux une autre encore plus petite. Elles ne sont pas visibles dans les épreuves de M. de la Rue, à cause de la différence de parallaxe que nous avons déjà signalée.

L est une protubérance très-élevée dont le sommet est nettement tracé dans toutes les photographies.

En Q est un arc rosé très-étendu; il est solarisé

dans notre épreuve, et il n'a pas été mieux réussi dans celle de M. de la Rue. Heureusement que nous pou-

Fig. 81.

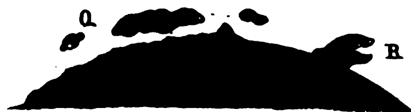


vons, par des observations directes, rétablir les détails qui sont effacés. Un instant après le milieu de la totalité, je regardai la région où le Soleil allait sortir du cône d'ombre ; je vis paraître une série de flammes vivement colorées en jaune et en rouge, et surtout je remarquai un nuage allongé de couleur rose, parfaitement suspendu dans l'intérieur de la couronne. J'en donnai immédiatement avis à mes collègues, afin qu'ils pussent contrôler mon observation, et je fis aussitôt le dessin qui est reproduit dans la *fig.* 82.

Cette forme était pour moi du plus grand intérêt, car je la regardais alors comme décisive au point de

vue de la théorie ; elle confirmait, d'une manière écla-

Fig. 82.



tante, des idées que nous pouvons maintenant appuyer sur des bases encore plus solides.

Il est regrettable que, dans cette phase, les deux séries de photographies se soient trouvées imparfaites; mais enfin nous possédons les documents nécessaires pour constater ce que nous désirions connaître. Là encore nous remarquons que les protubérances empiètent sur le disque de la Lune, comme nous l'avons déjà fait observer. Nous retrouvons aussi la protubérance R, la dernière que nous ayons signalée dans le dessin de la *fig.* 82.

Afin de pouvoir comparer nos photographies avec celles de M. de la Rue, nous les avons agrandies de manière à obtenir une figure de même dimension que les siennes. Puis, après avoir huilé une épreuve pour la rendre transparente, nous les avons superposées et nous avons pu constater une identité parfaite, sauf les détails désignés ci-dessus.

De ces importantes observations on peut évidemment tirer les conclusions suivantes :

1° Les protubérances ne sont pas de simples apparences produites par des illusions d'optique; ce sont des phénomènes réels ayant leur siége dans le Soleil. Nos observations ayant été faites à deux points distants l'un de l'autre d'une centaine de lieues, il est

impossible de supposer que des figures aussi nettes et aussi identiques soient produites par un phénomène de mirage ou par quelque autre cause semblable.

2° Les protubérances sont des amas de matière lumineuse ayant une grande vivacité et possédant une activité photogénique très-remarquable. Cette activité est si grande, que plusieurs des protubérances que nous voyons sur nos épreuves, et précisément la protubérance E (*fig.* 79), n'ont pu être observées directement, même avec de bons instruments : c'est peut-être parce qu'elles n'émettaient que des rayons chimiques, et peu ou point de rayons lumineux.

3° Il y a des amas de matières protubérantielles suspendus et isolés comme des nuages dans l'atmosphère. Si leur forme est variable, les variations se produisent assez lentement pour qu'il soit impossible de les constater durant un intervalle de dix minutes.

4° Outre les protubérances, il existe une zone de la même matière, et qui enveloppe le Soleil de toutes parts. Les protubérances proviennent de cette couche; ce sont des masses qui se soulèvent au-dessus de la surface générale, et s'en détachent même quelquefois. Quelques-unes d'entre elles ressemblent aux fumées qui sortent de nos cheminées ou des cratères des volcans, et qui, arrivées à une certaine hauteur, obéissent à un courant d'air en s'inclinant horizontalement.

5° Cette conclusion ressort évidemment de la protubérance C; elle avait déjà été mise en évidence par les nombreuses protubérances observées en 1851 et surtout en 1855.

6° Le nombre des protubérances est incalculable. Dans l'observation directe, le Soleil nous parut tout

environné de flammes; elles étaient tellement multipliées, qu'il nous paraissait impossible de les compter. L'observation photographique a pleinement justifié cette première impression.

7° La hauteur des protubérances est très-considérable, surtout si l'on remarque que, pour l'évaluer, il faut tenir compte de la partie éclipsée par la Lune. Ainsi la protubérance E n'a pas moins de 3 minutes de hauteur, ce qui correspond à dix fois le diamètre de la Terre; les autres ont, pour la plupart, de 1 à 2 minutes d'élévation.

Ces phénomènes n'ont pas été particuliers à l'éclipse de 1860. Pour en convaincre le lecteur, nous terminerons cette relation en reproduisant une figure tirée des photographies du major Tennant (*fig.* 83). Ces photographies exécutées à Guntoor, dans les Indes, pendant l'éclipse de 1868, ont été reproduites à Londres par M. de la Rue. On y voit la route suivie par la Lune, ainsi que son contour au commencement et à la fin de la totalité. On y voit également la position de l'équateur solaire et celle des pôles (1). Dans la gravure anglaise on avait exagéré la grandeur des taches. Nous leur avons restitué leur position et leur grandeur véritables, d'après les observations faites le même jour au Collége Romain.

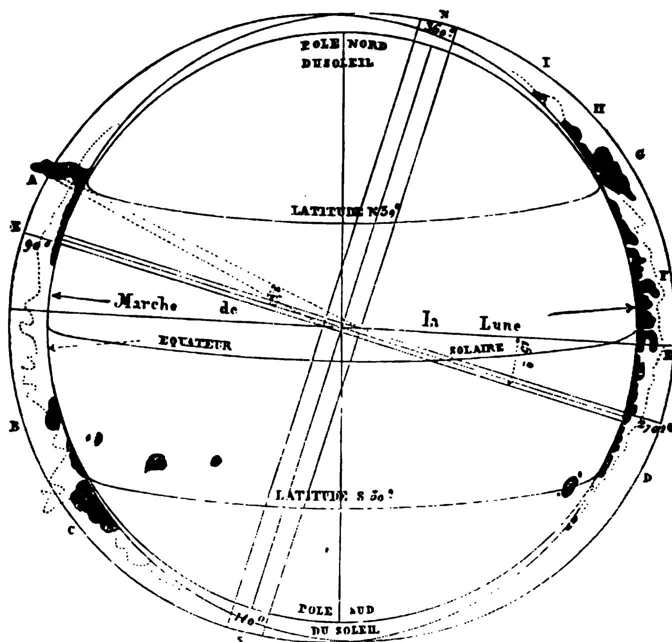
Cette figure parle assez par elle-même et fait voir quelles sont les dimensions des protubérances. Par l'observation directe, on avait trouvé pour la corne A une hauteur de 3 minutes; il résulte de l'observa-

---

(1) *Monthly Notices of Ast. Soc.*, vol. XXIX, n° 3.

tion photographique que cette hauteur est réellement

Fig. 83.

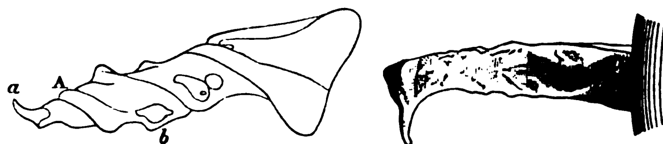


de 3′22″, plus de dix fois le diamètre de la Terre, environ 650 000 kilomètres.

Dans la dernière éclipse, le nombre des protubérances n'était pas moins grand qu'en 1860. De plus, les observateurs étant échelonnés sur une ligne très-longue, leurs observations embrassent un intervalle de temps plus considérable. Or on trouve que la grande protubérance photographiée à Aden diffère un peu de celle qui a été photographiée à Guntoor. On a donc la preuve d'un mouvement intérieur qui s'est produit d'une manière sensible pendant un in-

tervalle de quarante minutes. La réalité de ce mouvement, et des changements qui en sont la conséquence, est d'ailleurs confirmée par les dessins des différents observateurs. Ainsi, à Malacca, les observateurs français représentent la protubérance A inclinée vers la droite. Deux heures quarante minutes plus tard, à Mantawalock, elle apparaissait comme une tour droite avec une pointe dirigée dans le sens opposé (*fig.* 84). A Aden elle paraissait inclinée à droite, tandis qu'à Labouan elle se dirigeait vers la gauche. Du reste les observations optiques s'accordent avec les photographies pour la représenter avec une structure spirale, comme l'indique la *fig.* 84 due au major Tennant.

Fig. 84.



On a également remarqué dans les photographies les traces de l'arc rosé et une nébulosité assez vive s'étendant de l'équateur solaire jusqu'à la région des taches, observation qui justifie ce que nous avions dit en 1860 de la forme elliptique de l'atmosphère solaire. Cette atmosphère est indiquée dans la *fig.* 83 par un trait ponctué. En 1867, le P. Cappelletti avait observé dans la même région une lumière plus vive, et il avait pu faire cette remarque malgré un voile de nuages qui couvrait la couronne. Les conclusions finales de toutes ces observations sont les suivantes :

« Le Soleil est environné d'une atmosphère très-élevée, dont la hauteur est au moins égale à un quart de son rayon. Elle est plus étendue à l'équateur qu'aux pôles, et de plus sa hauteur et son éclat présentent deux maximums de part et d'autre de l'équateur entre 15 et 30 degrés de latitude. Dans cette atmosphère flotte une couche continue de matière rose, possédant un grand pouvoir photogénique, dont la hauteur est variable et le contour irrégulier. Cette matière se soulève quelquefois et forme tantôt des colonnes verticales, tantôt des nuages isolés; ces colonnes et ces nuages sont entraînés d'une manière très-appréciable par des courants atmosphériques. La couche rose possède une hauteur plus considérable et une plus grande activité photogénique dans la région des taches, là même où nous avons déjà constaté la plus grande élévation de température. »

Telles sont les conclusions auxquelles nous sommes conduit par les observations optiques et photographiques. Il restait à déterminer la nature physique et chimique de la couche rose; c'est ce qu'on a fait aux Indes pendant l'éclipse de 1868, ainsi que nous allons l'exposer.

§ III. — *Nature des protubérances solaires visibles dans les éclipses.*

Avant 1861, on aurait regardé comme impossible de déterminer la nature chimique des substances qui se trouvent dans les corps célestes. Mais depuis les découvertes de Bunsen et Kirchhoff, depuis les progrès de l'analyse spectrale, ce problème est devenu

aussi simple pour l'astronome que les analyses qualitatives pour le chimiste dans son laboratoire.

Depuis longtemps déjà on a appris à reconnaître dans certains cas la nature des substances qui brûlent d'après la coloration qu'elles communiquent à la flamme. Par exemple, on reconnaît le cuivre, le zinc, le fer à leurs flammes verte, bleue et jaune. Mais à l'aide du spectroscope on décompose la lumière, on l'étale en un spectre discontinu dans lequel on distingue des raies brillantes occupant toujours la même place lorsqu'on opère sur un même corps, dans des circonstances identiques. Les traités de Physique et de Chimie exposent tous cette question avec beaucoup de détails; il suffira donc de rappeler en peu de mots les principes dont nous devons avoir besoin, en nous réservant de compléter ces notions dans le Chapitre VIII.

Tout spectroscope se compose essentiellement des pièces suivantes : une fente étroite à bords parallèles, éclairée par la lumière qu'on veut analyser; un prisme, ou un système de plusieurs prismes, pour disperser la lumière; enfin une lunette destinée à concentrer dans l'œil les rayons lumineux. Le prisme se trouve entre la fente et la lunette, et ses arêtes doivent être parallèles à la fente. Entre la fente et le prisme on interpose ordinairement une lentille qui, avec la fente, constitue ce qu'on appelle le *collimateur*, et qui permet de diminuer les dimensions de l'appareil; car la fente, quoique assez rapprochée, paraît comme placée à une distance infinie. Lorsqu'on regarde à travers un semblable système la flamme d'un métal ou la lumière des tubes de Geissler, on voit un nombre plus

ou moins considérable de raies brillantes séparées par des espaces obscurs, dont la couleur et la position sont différentes pour les différentes substances, mais demeurent rigoureusement invariables pour chacune d'elles.

Nous décrirons ailleurs les appareils employés pour l'étude des flammes terrestres; contentons-nous, pour le moment, d'expliquer celui qui a été adopté par les astronomes, surtout pour l'observation du Soleil.

La *fig.* 85 réprésente l'instrument que nous possé-

Fig. 85.



dons à l'Observatoire du Collége Romain, et qui présente des avantages particuliers dont nous parlerons bientôt.

XYZ est une platine circulaire sur laquelle sont placés deux prismes C, D, et les supports de deux tubes BU, EH. Le tube BU peut être adapté à la lunette comme un oculaire, par l'intermédiaire de l'écrou OO', et il porte dans son intérieur le collimateur du spectroscope. En F se trouve la fente devant laquelle est adapté un petit prisme réflecteur servant à introduire des lumières auxiliaires qu'on veut comparer avec celle dont on cherche la nature. Sur le côté on voit un petit appareil M destiné à supporter des corps lumineux artificiels, par exemple des tubes de Geissler contenant des gaz raréfiés, ou bien deux fils entre lesquels on fait jaillir une série d'étincelles, ou enfin une lumière quelconque.

En K est une lentille qui forme sur la fente F une image agrandie du Soleil. En enlevant l'appareil M, on peut voir directement cette image, et reconnaître les points du disque solaire sur lesquels porte l'analyse. On peut encore, dans le même but, employer le chercheur de la grande lunette.

Le tube EH contient un prisme à vision directe (*fig.* 86), dernière invention de l'opticien italien

Fig. 86.



Amici, composé de cinq prismes, dont la puissance dispersive est égale à celle des deux autres, et double par conséquent la valeur de l'appareil. C, C, C sont trois prismes de crown, F, F deux prismes de flint; la

lumière passant à travers ces prismes ainsi disposés se disperse et se décompose sans subir de déviation, puis elle traverse la lunette HL dont l'oculaire est au besoin garni d'un fil micrométrique. Cette lunette porte en outre un collimateur latéral G dont l'extrémité porte une fente très-étroite; cette fente est éclairée par une lumière artificielle, afin de fixer la position des raies lorsqu'on observe des objets faiblement lumineux, par exemple les étoiles et les nébuleuses. Cette lumière est renvoyée vers l'œil de l'observateur par une réflexion qu'elle subit sur l'une des faces du prisme à vision directe. On peut au besoin augmenter ou diminuer le nombre des prismes, suivant la nature des objets soumis à l'observation.

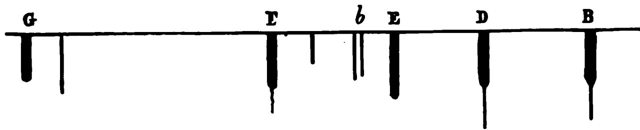
C'est avec un appareil ainsi construit que les astronomes ont analysé la lumière des protubérances. Les propriétés du spectre devaient faire connaître leur nature physique et chimique.

En effet, toute matière simplement incandescente produit un spectre continu; c'est ce qui arrive pour le charbon incandescent qui se trouve en suspension dans la flamme. Les gaz eux-mêmes peuvent donner un spectre continu lorsque leur température est extrêmement élevée; mais toutes les fois qu'on obtient un spectre discontinu composé de raies isolées, on est certain d'avoir affaire à une matière gazeuse, et alors la nature chimique de cette matière peut être déterminée par le nombre et la position des raies. Tous ceux qui ont observé avec de bons instruments ayant trouvé un spectre discontinu, nous devons conclure, d'après les principes que nous venons d'énoncer, que les protubérances sont de nature gazeuse. C'est ce

que nous ont appris MM. Janssen, Rayet, Herschel, Weisse, Tennant, etc.

Pour reconnaître la nature des substances protubérantielles, il fallait fixer avec exactitude la position des raies; malheureusement les observateurs n'ont pas été parfaitement d'accord, soit à cause de l'insuffisance de leurs instruments, soit parce qu'ils manquaient d'échelles construites d'avance. L'analyse la plus détaillée est celle de M. Rayet. En observant la protubérance A (*fig.* 83) il observa sept raies principales; quelques-unes d'entre elles avaient une telle vivacité, qu'elles produisaient une espèce de queue dans le champ de l'instrument; nous en reproduisons ici la figure telle qu'elle se trouve dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* (*fig.* 87).

Fig. 87.



La position de ces raies a paru coïncider à peu près avec celle des raies noires que Fraunhofer a désignées par les mêmes lettres; mais il doit y avoir eu là quelque inexactitude : on a désigné par la lettre B celle qui correspond à C; la raie désignée par D ne coïncide pas rigoureusement avec celle de Fraunhofer; la position de F est exacte, mais celle de G est seulement approchée. La position de C a été signalée par Janssen et par Herschel; ce dernier cependant n'a pu la donner d'une manière précise, à cause

des nuages qui gênèrent ses observations. M. Rayet fit ses observations en mettant la fente successivement dans deux directions faisant entre elles un angle droit; aussi sommes-nous parfaitement certain que le spectre ainsi observé appartient bien réellement à la protubérance.

Dans une seconde observation, il analysa la lumière d'un second appendice, et il ne trouva plus qu'une seule raie située dans le violet; d'où il faudrait conclure que toutes les protubérances n'ont pas la même composition chimique.

L'existence de la raie F étant parfaitement constatée, on était bien sûr que le gaz hydrogène était l'une des matières composant cette protubérance; mais il fallait déterminer la nature des gaz auxquels devaient correspondre les autres raies. La température était évidemment très-élevée, et comparable à celle que produit le passage de l'étincelle électrique dans les tubes de Geissler. Du reste cette comparaison sert à expliquer la couleur rose des protubérances, puisque l'hydrogène se colore ainsi lorsque, étant raréfié, on l'illumine par une décharge électrique.

Cependant, il fallait s'assurer parfaitement de l'identité des différentes raies; cette étude paraissait exiger qu'on attendît une nouvelle éclipse, mais M. Janssen nous a dispensés d'une attente trop longue par une découverte de la dernière importance. Ce physicien, frappé de l'éclat que présentaient les raies des protubérances, fut porté à croire qu'elles seraient visibles, même en plein jour. Malheureusement, le ciel se couvrit de nuages peu de temps après l'éclipse, et il lui fut impossible ce jour-là de vérifier sa con-

jecture. Dès le lendemain il se mit à l'œuvre, et eut l'insigne bonheur de voir en plein jour les raies des protubérances. En dirigeant la fente du spectroscope exactement tangentiellement au bord du Soleil, à l'endroit où, la veille, il avait remarqué une flamme, il vit paraître dans le champ de la lunette une raie brillante colorée en rouge, correspondant à la raie C de Fraunhofer, puis dans le bleu une autre raie brillante correspondant exactement à la raie F. Ces deux raies sont précisément celles de l'hydrogène, d'où il résulte que ce gaz est la principale des substances qui constituent les protubérances.

Le jour même où cette nouvelle arriva en Europe (20 octobre), M. Lockyer annonçait que, de son côté, il était parvenu à la même conclusion. Il avait pu voir, sur le bord du Soleil, les raies de l'hydrogène, accompagnées d'une raie inconnue située près de la raie D. Cette découverte était trop importante pour n'être pas immédiatement vérifiée, et il nous fut possible d'y réussir le jour même où la nouvelle nous en parvint. Nous avons étudié cette question avec soin, et nous sommes arrivé, ainsi que les autres observateurs, aux conclusions que nous allons exposer dans le paragraphe suivant.

§ IV. — *Résultats des études spectrales faites en plein jour sur les protubérances.*

Quoique nous devions parler dans le Chapitre suivant de l'analyse spectrale de la lumière solaire, nous tenons à exposer dès maintenant les résultats auxquels on a été conduit par la découverte de MM. Janssen et

Lockyer, car ces résultats sont intimement liés avec le sujet qui nous occupe actuellement. Pour rendre plus faciles à saisir les détails qui vont suivre, nous donnerons ici une planche coloriée représentant le spectre solaire avec les raies de Fraunhofer.

En opérant comme nous l'avons indiqué, il est très-facile d'observer les protubérances en plein jour à l'aide du spectroscope. Il faut employer une lunette dont la longueur focale soit assez grande pour fournir une image considérablement amplifiée. On réussit très-bien avec un spectroscope de poche adapté à une lunette de 10 centimètres d'ouverture, ayant une longueur focale de 2 mètres. Cependant lorsqu'on veut faire une étude sérieuse et prendre des mesures précises, il faut se servir d'un instrument plus puissant. Nous avons employé à cet usage notre grand équatorial de 25 centimètres, en plaçant auprès du foyer un oculaire destiné à amplifier l'image du Soleil. De cette manière il était beaucoup plus facile de déterminer la position précise des protubérances et d'en étudier les détails. L'appareil étant ainsi disposé, la fente étant aussi étroite que possible, et sans mettre aucun verre coloré à l'oculaire, on peut avec la plus grande facilité, et en employant l'objectif avec toute son ouverture, diriger la lunette vers l'un quelconque des points du Soleil ou vers le bord de son disque. Le spectroscope est disposé de manière à ce qu'on puisse facilement faire varier la position de la fente pour la rendre tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire au bord du Soleil.

En observant de cette manière, on a obtenu les résultats suivants :

1° Supposons la fente perpendiculaire au bord et divisée en deux parties égales par le contour du disque. Quel que soit le point que l'on observe, on aperçoit toujours un spectre composé de deux zones inégalement éclairées, mais possédant toutes les deux les raies caractéristiques; la zone la plus brillante appartient au Soleil, l'autre à l'espace environnant. Près de la ligne de séparation de ces deux zones, un peu en dehors du disque solaire, on voit une portion des raies noires C et F briller d'un vif éclat. De plus, dans le jaune, auprès du point D, du côté du vert, on voit briller une raie jaune. Enfin on aperçoit une autre trace brillante dans le voisinage de la raie G.

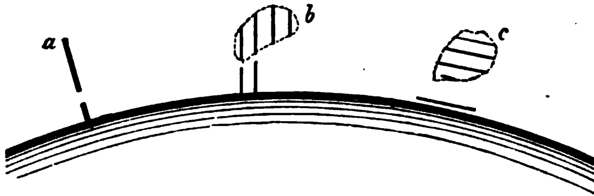
A l'exception de celle qui correspond au jaune, toutes les raies que nous venons de signaler appartiennent à l'hydrogène; d'où il suit que ce gaz forme une couche générale autour du Soleil.

2° Cette couche a une épaisseur de 10 à 15 secondes, mais elle est très-irrégulière; on peut le constater en disposant la fente perpendiculairement au bord et en mesurant l'étendue des portions brillantes. Cependant, on remarque bien souvent que la ligne noire isparaît d'une manière complète sans donner lieu à ne ligne brillante; c'est ce qui arrive surtout auprès s facules et des taches. Ce fait démontre que l'hyogène existe bien au delà des lignes brillantes, is seulement en quantité suffisante pour neutrar la ligne noire sans y substituer la raie brillante. disposant la fente tangentiellement au bord, on les raies acquérir une longueur égale à la largeur pectre et devenir très-vives.

' En plusieurs points du contour solaire on voit

des lignes brillantes acquérir et même dépasser notablement la longueur qui correspond à 15 secondes; elles se présentent quelquefois comme des fragments de lignes isolées détachés du bord, ainsi qu'on le voit dans la *fig.* 88 en *a* et en *b* pour le cas où la fente est

Fig. 88.



perpendiculaire au bord, ou comme en *c* lorsqu'elle lui est parallèle. On voit, par cet exemple, que, d'après la forme et la disposition des raies, on peut tracer la forme des protubérances en déplaçant convenablement le spectroscope.

On peut donc, par ce moyen, étudier les protubérances avec la plus grande facilité même en dehors des éclipses, signaler leur présence, déterminer leur forme et les dessiner avec autant de fidélité que si elles étaient visibles.

4° La raie brillante qui se trouve dans le voisinage du point D ne correspond à aucune raie noire, ni à aucune des raies que l'on observe dans le spectre de l'hydrogène lorsque ce gaz est rendu lumineux à basse pression. La retrouverait-on dans le spectre de ce même gaz, en observant dans des conditions de température et de pression différentes de celles que nous pouvons produire? Il est permis d'en douter, car nous avons observé qu'elle ne subit pas les mêmes

variations que les raies C et F; elle est souvent très-faible dans des circonstances où les autres sont très-vives. Aussi sommes-nous porté à croire qu'elle n'appartient pas à l'hydrogène. Outre ces raies, on en remarque quelquefois plusieurs autres dans le groupe du vert, et surtout quelques-unes de celles qui appartiennent au magnésium; mais elles sont très-faibles. Nous avons remarqué que la raie jaune paraît coïncider avec une ligne très-brillante qu'on observe dans le spectre ordinaire du Soleil, lorsqu'on emploie un spectroscope à neuf prismes. Sa position est telle, qu'en prenant pour unité la distance des deux raies D′ et D″ du sodium, elle en est éloignée de deux fois et demie cette largeur.

5° Nous venons de dire que, pendant l'éclipse de 1868, les observateurs avaient remarqué, dans le spectre des protubérances, des raies différentes de celles de l'hydrogène; il y avait lieu de s'assurer si elles seraient encore visibles en plein jour. Nous avons eu le bonheur de rencontrer une de ces protubérances le 20 mai 1869. La *fig.* 89 montre l'ensemble des raies

Fig. 89.



que nous avons observées. Outre les raies de l'hydrogène, G, F, γ et la raie D_3, on en remarquait deux autres : l'une brillait entre les deux raies les plus voisines du magnésium, l'autre était la troisième raie du

magnésium renversée; elles sont marquées en *b*. De plus, nous en avons remarqué deux en *y* et *z*, entre *b* et F; une en *x* entre D_2 et *b*; une autre plus faible en *t*, près de D_1. Il a été impossible de déterminer d'une manière satisfaisante les substances chimiques qui correspondent à ces raies secondaires, mais la raie *x* semble appartenir au fer. Ce qu'il y a de plus singulier, c'est que, de toutes celles qui caractérisent le magnésium, une seule est renversée; les autres ne le sont pas, et la raie brillante se montre dans l'intervalle qui les sépare. Du reste, cet intervalle correspond aussi à une raie brillante du Soleil, de sorte qu'on peut déjà affirmer que les raies des protubérances ne sont pas toutes renversées.

6° Le spectroscope employé de cette manière ne permet d'étudier les protubérances que par tranches. Mais en employant une image du Soleil dont le diamètre ne dépasse pas 20 ou 30 millimètres, et en élargissant un peu la fente, on peut les voir en entier. On peut donner à la fente une largeur d'un demi-millimètre, et même davantage: on voit alors l'image rouge de la protubérance. On rend l'observation plus facile en employant un verre rouge qui laisse passer les rayons C. Alors on voit le contour du Soleil tout environné de protubérances, surtout auprès des taches et des facules, et tout le contour présente un aspect analogue à celui qui est indiqué dans la *fig*. 90. M. le pro-

Fig. 90.



fesseur Respighi, qui s'est occupé particulièrement de cette étude, nous a communiqué le dessin d'une protubérance qu'il a observée à Rome, le 26 février 1870, à $10^h 40^m$. La hauteur de cette protubérance (*fig.* 91)

Fig. 91.



était de 2′30″. Ces masses présentent en général la forme de jets gazeux qui s'inclinent et retombent à partir d'une certaine hauteur. Les détails sont très-bizarres et prennent souvent l'aspect d'une véritable végétation.

Tels sont les faits principaux qu'on a pu constater jusqu'au moment où nous écrivons. Ces faits font naître quelques réflexions et demandent des éclaircissements.

1° Comment se fait-il qu'on puisse, à l'aide du spectroscope, étudier les protubérances en dehors des éclipses? Les astronomes avaient inutilement employé beaucoup d'autres moyens; ils ont essayé de petits diaphragmes, afin d'écarter de leurs lunettes toute lumière étrangère; ils ont employé dans le même but des verres colorés; mais ils n'ont jamais

réussi à rien entrevoir par ces procédés, tandis que le spectroscope a conduit du premier coup à un succès inespéré. La raison en est très-simple, et elle a été déjà signalée par Arago. Ce grand astronome faisait remarquer que pour voir les protubérances, il suffirait de diminuer la lumière du ciel de manière à la rendre plus faible que celle des protubérances elles-mêmes. C'est ainsi, disait-il, qu'on parvient à voir les étoiles en plein jour; les lunettes affaiblissent la lumière de l'atmosphère, parce qu'elles amplifient la portion du ciel qui se trouve dans le champ, sans grossir les étoiles qui n'ont pas de diamètre apparent. Tel est le rôle du spectroscope dans la circonstance qui nous occupe. Il disperse et étale dans une bande assez diffuse la lumière de l'atmosphère terrestre et de l'atmosphère solaire, sans pouvoir disperser le petit nombre de rayons simples qui composent le spectre de la protubérance. Ceux-ci conservent donc toute leur intensité, tandis que les autres sont très-affaiblis. C'est ce qu'on observe également dans l'étude des autres corps célestes. Une étoile de sixième ou de septième grandeur, dont le spectre est discontinu, est bien plus facile à observer que les étoiles jaunes de troisième ou de quatrième grandeur. De même, les raies des nébuleuses planétaires brillent avec vivacité dans le champ du spectroscope, et leur éclat est comparable à celui d'une bougie, quoique ces nébuleuses ne soient pas plus visibles que des étoiles de neuvième grandeur!

Il est surprenant que les astronomes n'aient pas fait plus tôt cette découverte, car, avec un bon spectroscope, l'observation est très-facile, et pour la faire

avec succès il ne nous en a coûté que la peine d'adapter l'instrument à la lunette. C'est là un de ces faits qui nous montrent que, en physique, il ne faut pas se laisser détourner de ses recherches par les échecs que subissent les autres. Quelques astronomes ayant employé des appareils très-imparfaits, comme on l'a reconnu depuis, n'avaient obtenu que des résultats négatifs, et c'est ce qui a empêché de faire cette découverte si facile. Nous devons cependant ajouter que, sans les observations faites pendant l'éclipse, on n'aurait pas aussi bien compris cette méthode et les résultats auxquels elle conduit.

2° Il faut bien remarquer que la découverte actuelle nous fait seulement connaître la nature des protubérances et de la couche rosée dont elles font partie; mais l'existence de cette couche était parfaitement constatée par les arcs en forme de scie qu'on avait vus autour de la Lune dès 1842. Bessel, observant une éclipse annulaire à Kœnigsberg, avait vu le bord de la Lune environné d'un cercle rouge. La couleur même des protubérances et les relations nombreuses qu'elles ont avec les arcs rosés, prouvaient bien que ces deux phénomènes dépendaient l'un de l'autre, et que leur nature était identique. Enfin, les photographies exécutées en 1860 par M. de la Rue et par nous montraient cette identité d'une manière irréfutable.

3° Il était naturel de chercher les relations qui existent entre les protubérances et les taches; c'est ce que nous avons fait en étudiant les variations de la raie C, variations qui nous permettent de déterminer tous les points du disque où se trouvent les pro-

tubérances. Nous avons pu constater qu'elles sont très-nombreuses et très-vives dans le voisinage des taches, et surtout dans les facules et les queues qui les suivent; nous n'avons examiné aucune facule sur le bord solaire, sans la trouver accompagnée de protubérances très-vives et très-élevées. Nos observations prouvent également que les différents points du Soleil sont loin d'avoir des spectres identiques, comme on l'a cru jusqu'à présent. Mais ces observations sont très-délicates, d'autant plus que, pour un même point du Soleil, les variations du spectre sont continuelles; aussi tout ce qu'on peut faire, c'est de constater ces différences sans pouvoir les étudier d'une manière précise et détaillée.

4° En étudiant la couronne pendant l'éclipse de 1868, on avait trouvé qu'elle donnait un spectre continu. Peut-être les observateurs n'étaient-ils pas bien préparés à cette observation délicate. Pendant l'éclipse du 7 août, les Américains ont constaté que la lumière de la couronne, analysée au spectroscope, donne quelques raies isolées dont la principale et la plus brillante coïncide avec celle de nos aurores boréales. Ce fait demande à être confirmé, et il est assez important pour qu'on en fasse l'objet d'études spéciales dans les prochaines éclipses.

Quoiqu'on ait réussi à voir les protubérances en plein jour, les éclipses seront toujours très-utiles, surtout pour l'étude détaillée de leurs formes. On se borne, en effet, à dessiner leurs images rouges, sans pouvoir obtenir les images jaunes, bleues et violettes. De plus, le verre rouge absorbe les autres couleurs et modifie par là le contour des protubérances. Il sera

donc intéressant, dans les prochaines éclipses, de les dessiner simultanément par les deux procédés, afin de faire une étude comparative.

§ V. — *Conclusions relatives à l'atmosphère solaire.*

Nous avons déjà formulé les principales conclusions qui résultent des observations optiques et photographiques. Nous pouvons maintenant nous faire une idée assez exacte de l'atmosphère qui enveloppe le Soleil.

1° Au delà de la limite apparente du disque solaire, il existe une atmosphère transparente, mais jouissant d'un pouvoir absorbant assez considérable pour pouvoir arrêter une partie des rayons solaires.

2° Cette atmosphère n'a pas partout la même hauteur; elle atteint son maximum à l'équateur et dans la région des taches; elle devient minimum aux pôles.

3° Dans cette atmosphère flotte une couche gazeuse dont la température est très-élevée et de laquelle s'échappent les protubérances. L'hydrogène est le principal élément de ces appendices et de la couche rosée qu'on observe pendant les éclipses.

4° Cette couche enveloppe le Soleil de toutes parts, et son épaisseur est variable. Elle n'est pas exclusivement composée d'hydrogène; elle contient encore d'autres substances, et en particulier de la vapeur de sodium et de magnésium. Des observations délicates font encore constater la présence de la vapeur d'eau.

Telles sont les conclusions relatives à l'atmosphère solaire. Nous voyons que, contre toute attente, il a

été possible d'en déterminer jusqu'à la composition chimique. Il nous reste maintenant à étudier la photosphère elle-même ; les puissants moyens qui sont à notre disposition nous permettront de rechercher avec quelque chance de succès sa composition et sa structure.



CHAPITRE VIII.

ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE SOLAIRE.

L'ordre et l'enchaînement des idées nous ont forcé à condenser, dans le Chapitre précédent, un grand nombre de faits et de découvertes; aussi nous a-t-il été impossible de développer d'une manière suffisante quelques-uns des sujets que nous avons été contraint d'aborder. Nous allons combler cette lacune et donner au lecteur tous les éléments nécessaires pour comprendre parfaitement ces importantes et difficiles questions.

Nous avons signalé un fait remarquable, l'exacte coïncidence des lignes brillantes que présente le spectre des protubérances avec quelques-unes des raies noires du spectre solaire. Exposons en peu de mots la théorie de cette inversion, et on en comprendra bien vite l'importance pratique; on verra comment nous pouvons, à l'aide du spectroscope, juger de la présence des différentes substances dans les astres, et faire, pour ainsi dire, l'analyse chimique de ces corps. Jusqu'à nos jours, les découvertes de l'Astronomie, quelque merveilleuses qu'elles fussent, étaient toujours bornées aux mouvements des corps célestes, à leurs masses ou à leurs volumes; maintenant, l'analyse spectrale nous permet de déterminer la nature intime de la matière qui les compose. La lumière est le seul

agent qui nous mette en relation avec ces mondes lointains; c'est à elle que nous devons demander des renseignements sur leur constitution physique et leur composition chimique.

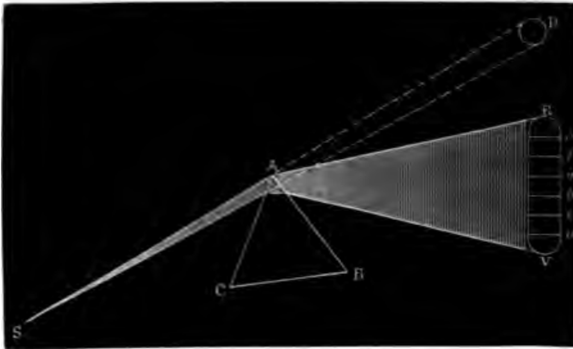
Nous allons exposer avec ordre les résultats que la spectrométrie a si rapidement obtenus. Cette science, née d'hier, a déjà fait des progrès considérables; mais, en raison même de la rapidité avec laquelle elle s'est développée, elle a contribué à répandre des idées inexactes, contre lesquelles il faut se prémunir si l'on ne veut pas faire fausse route dans l'étude des corps célestes. C'est pour cela que nous croyons devoir reprendre la question d'un peu plus haut, en exposant nettement les vrais principes de spectrométrie. Ce ne sera pas nous éloigner de notre sujet, car on peut dire que la principale application de cette science est celle qui regarde l'étude des astres.

§ I. — *Analyse de la lumière solaire par le prisme. — Spectre solaire.*

Il semble qu'en offrant à nos regards les brillantes couleurs de l'arc-en-ciel, la nature ait voulu nous inviter à étudier la composition de la lumière et à reconnaître sa nature; cependant ce mystère ne fut dévoilé que bien tard. Depuis longtemps on connaît le *verre triangulaire*, c'est ainsi qu'on désignait autrefois le prisme; sa propriété de colorer les objets les plus grossiers et de les transformer en un amas de pierres précieuses, en faisait un amusement vulgaire, mais peu digne de l'attention d'un philosophe. Grimaldi fut un de ceux qui l'étudièrent avec le plus

de soin et de succès. Il perça une ouverture dans le volet d'une chambre noire, introduisit par là un rayon lumineux et lui fit subir l'action du prisme. Il put alors observer attentivement le spectre solaire; il en donna une description très-soignée et proposa une explication de l'arc-en-ciel (*Physico-mathesis de lumine*, prop. XXX et seq., p. 235, etc.). La *fig.* 92

Fig. 92.



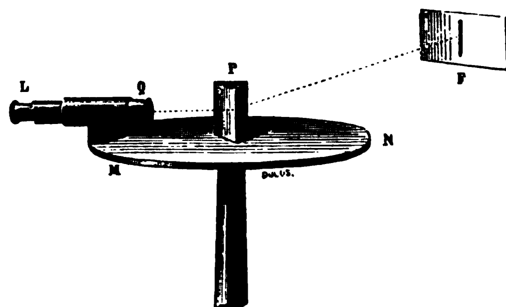
montre la disposition de l'expérience bien connue en physique. Le rayon solaire SD, reçu par le trou d'un volet dans la chambre obscure, est brisé par l'angle A du prisme ACB, s'étale en reproduisant les couleurs de l'arc-en-ciel et en dessinant le spectre RV sur la paroi opposée. Newton répéta ces expériences et reconnut que les différents rayons du spectre peuvent subir, sans altération, l'action d'un second prisme. Il alla plus loin, recomposa la lumière blanche, fixa les noms des différentes couleurs et les proportions dans lesquelles on doit les combiner pour reproduire une lumière analogue à celle du Soleil.

Depuis Newton, Wollaston est le premier qui ait

fait faire à cette branche de l'optique un progrès sérieux. En regardant une fente étroite à travers un prisme, il vit que le spectre, au lieu d'être continu, présentait des lacunes ou raies noires qui le partageaient en plusieurs parties. Cette découverte passa inaperçue; elle resta stérile pour la science, jusqu'au moment où Fraunhofer, voulant déterminer d'une manière précise l'indice de réfraction des verres qu'il employait, aperçut et découvrit de nouveau le même phénomène; il imagina des méthodes pour étudier ces raies, les dessiner et fixer leur position par des mesures exactes.

L'expérience fondamentale de Fraunhofer se fait de la manière suivante: Sur un plateau horizontal MN (*fig.* 93), on place un prisme triangulaire P, de cristal

Fig. 93.



très-pur; à une certaine distance se trouve une fente F, très-étroite, à bords parallèles, éclairée, à l'aide d'un héliostat, par un rayon de lumière solaire. Ce rayon tombe sur le prisme, et, après avoir subi la déviation sous l'angle minimum, il entre dans l'objectif de la lunette QL, qui sert ainsi à étudier les différentes par-

ties du spectre. Afin de bien discerner les raies, il faut d'abord viser directement la fente, et disposer l'oculaire de manière à la voir nettement; puis, après avoir fait subir au rayon lumineux l'action du prisme, on l'observe avec la lunette, et, en déplaçant légèrement l'oculaire, on met au point de manière à voir nettement les raies. Si le prisme est de bonne qualité et si la lunette est achromatique, on apercevra un nombre très-considérable de raies très-fines; on en voit un spécimen dans la *fig.* 1, *Pl. I*, où les principales seulement sont représentées. Cette figure est assez semblable à celle de Fraunhofer; elle a été tracée par M. Van der Willingen.

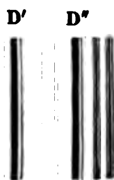
Les principales raies sont désignées par les lettres A, B, C, D, E, *b*, F, G, H. On joint à ces lettres des chiffres destinés à faciliter la comparaison avec le tableau des longueurs d'onde que nous donnons plus loin.

On a perfectionné le mode d'observation de Fraunhofer en ajoutant à son appareil un collimateur; c'est une lunette disposée de manière à ce que le foyer principal de son objectif coïncide avec la fente; les rayons qui traversent la fente sortent de cet objectif parallèlement entre eux, comme si la fente elle-même était située à une distance infiniment grande, de sorte que l'oculaire de la lunette peut être disposé comme pour l'observation d'un objet lointain. C'est cette disposition qui constitue le spectroscope ordinaire que l'on adapte à la lunette à la place de l'oculaire.

En ajoutant plusieurs prismes, on obtient un spectre très-étalé, même avec un instrument de petites dimensions, comme celui que nous avons décrit dans le

Chapitre précédent, et que nous employons à l'observation des protubérances. Le spectre étant ainsi plus étalé, les raies sont plus espacées, et, par conséquent, plus distinctes les unes des autres. En employant quatre prismes, M. Kirchhoff en a distingué et dessiné deux mille environ; avec neuf prismes, on peut en compter plus de cinq mille. On retrouve ces raies même dans la partie ultra-violette du spectre, bien que cette partie soit invisible; M. Rutherfurd en a déterminé plusieurs centaines à l'aide de la photographie. En employant des instruments puissants, on peut souvent dédoubler des raies qui paraissent simples au premier abord. La raie D se dédouble très-facilement; mais, avec un spectroscope puissant, on reconnaît qu'en réalité elle est quintuple; car entre les deux raies principales D' et D'', il y en a trois autres au moins, sans compter celles qui sont à l'extérieur (*fig.* 94). On peut comparer ces observations

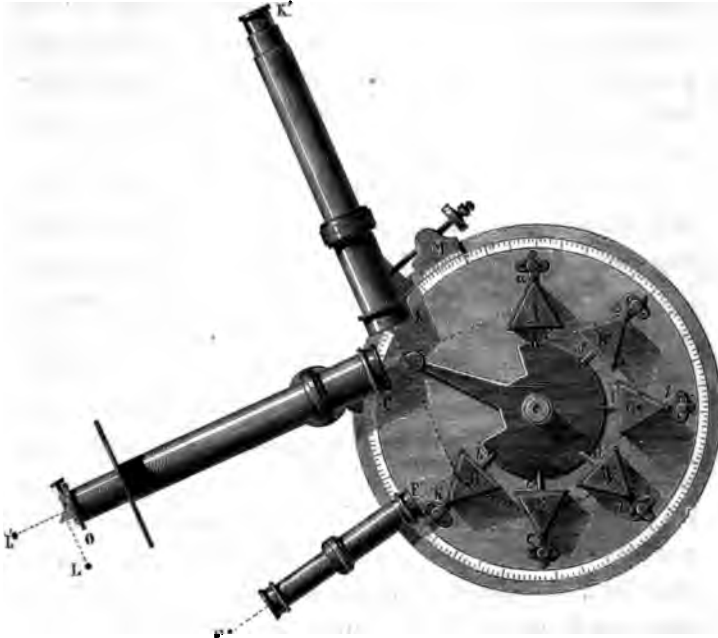
Fig. 94.



avec celles des étoiles multiples; dans les deux cas, le succès dépend de la puissance des instruments qu'on emploie. Pour ces recherches, on construit des appareils qui contiennent neuf prismes, et même davantage; ces prismes sont faits d'une substance fortement dispersive, comme le flint lourd ou le sulfure de carbone. Tel est celui représenté dans la *fig.* 95, qui

est composé de six primes. OC est le collimateur, KK′ la lunette d'observation, et *p* une petite lunette

Fig. 95.



collimateur qui porte une échelle graduée au lieu de la fente. L'image de cette échelle, réfléchie par le dernier prisme, arrive à l'œil avec les rayons dispersés et sert à fixer leur position.

Le spectre solaire est donc loin d'être continu ; les raies noires que nous venons de signaler sont de véritables lacunes ; elles tiennent la place de certains rayons ayant un indice de réfraction déterminé, et qui font défaut dans la lumière du Soleil. Ce que nous

disons de la lumière directe est également vrai de la lumière réfléchie. On obtient le même spectre, avec les mêmes raies, en analysant la lumière de la Lune, celle des grandes planètes, des nuages et de tous les corps éclairés par le Soleil. Indépendamment de ces raies bien définies, on remarque encore des traits qui paraissent indécis; en les observant avec des instruments puissants, on parvient souvent à les décomposer en lignes noires très-fines.

Les raies brillantes n'ont pas toutes la même intensité lumineuse. Les appareils les plus dispersifs sont ceux qui leur donnent plus d'éclat, surtout dans le jaune et dans le vert. De même, les lignes noires ne sont pas toutes également obscures; il y a des gradations différentes, qui, dans la Table de M. Kirchhoff, ont été désignées par des chiffres compris entre 1 et 6. On désigne de même leur largeur par des lettres comprises entre *a* et *g*. Nous terminons ce paragraphe par un tableau des longueurs d'onde propres à un certain nombre de raies prises parmi les plus importantes, avec les notations et les chiffres de M. Kirchhoff. Nous ajoutons le nom des substances qui, lorsqu'elles sont incandescentes, donnent des raies brillantes correspondant identiquement aux raies noires qu'on voit dans le spectre solaire.

Nous ne prétendons pas donner une liste complète; on la trouvera dans les travaux originaux de Kirchhoff, Angström, Plücker, Thalen, Van der Willingen, etc. La Table que nous donnons ici suffit pour mettre le lecteur au courant des travaux essentiels qui sont relatifs à ce sujet. Nous avons préféré les mesures de longueurs d'onde de M. Van der Villingen, parce

qu'elles ont soutenu avec avantage la comparaison avec celles des autres savants, Ditscheiner, Mascart, Fraunhofer, Angström; on peut s'en convaincre par l'accord qui existe entre les chiffres donnés par M. Angström et ceux que nous reproduisons. Pour ce qui regarde l'identification de ces lignes avec les raies de la figure de Kirchhoff, la chose n'est pas toujours aussi facile, car l'échelle de ce physicien, outre qu'elle est arbitraire, n'est pas toujours constante avec elle même. M. Airy a inutilement tenté de trouver une formule qui donnât la longueur d'onde en fonction des divisions de cette échelle. Quant à M. Angström, il a rapporté le plus grand nombre des raies à leur longueur d'onde réelle et a donné des tableaux et des figures où chaque raie occupe la place qu'elle doit avoir, selon la longueur de l'onde relative. Il a appelé cette figure *spectre normal* du Soleil.

Tableau des longueurs d'onde relatives aux raies principales du spectre solaire, d'après les mesures de M. VAN DER WILLINGEN, *comparées avec celles de* MM. ANGSTRÖM *et* KIRCHHOFF.

LETTRES de Fraunhofer.	NOMBRES et lettres de Van der Villingen.	LONGUEURS D'ONDE, en millionièmes de millimètre, selon V. d. W.	selon Angström.	NOMBRES de la figure de M. Kirchhoff.	INTENSITÉ et largeur selon le même.	SUBSTANCES correspondantes.
	1 α	763,36	"	"	"	
A	1 β	760,92	761,2	404,1	6	Diffuse aux bords.
	2 α	728,13	"	"	"	
	2 β	724,38	"	"	"	
	3 α	718,97	"	"	"	
	3 β	718,86	"	"	"	
B	4 α	687,48	687,5	592,6	6 c	Diffuse aux bords.
	4 β	687,12	"	"	"	
C	5	656,56	656,8	694,1	6 c	Hydrogène.
	6	651,94	"	711,5	"	
	7	649,77	"	719,5	"	
	8 α	628,11	"	"	"	
	8 β	628,00	"	"	"	
	...	625,90	"	"	"	Atmosphérique. Très-forte. Ce de Brewster.
	9	619,45	619,2	849,7	3 c	Fer.
	10	616,49	616,3	863,9	5 b	Calcium.
	...	"	614,3	874,3	4 b	Baryum.
	11	613,96	613,9	877,0	4 c	Fer.
	12	612,52	612,4	884,9	4 b	Calcium, cobalt.
	13	610,52	610,5	894,9	2 c	Calcium.
D_1	14 α	589,86	590,0	1002,8	6 b	Sodium.
D_2	14 γ	589,26	589,4	1006,8	6 b	
	15	562,70	"	1200,4	"	
	16	561,80	561,80	1207,3	5 g	Fer.
	17	553,19	"	1280,0?	"	
	18	547,86	"	1324,0?	"	
	19	545,83	546,0	1343,5	6 c	Fer.
	20	537,38	537,4	1421,6?	5 b	Fer.
	21	533,05	533,2	1463,0	5 c	Fer. Double.
E	22 α	527,24	527,4	1522,7	6 c	Fer, calcium.
	22 β	527,04	527,3	1523,7	6 c	Fer.

Tableau des longueurs d'onde, etc. (Suite.)

LETTRES de Fraunhofer.	NOMBRES et lettres de Van der Villingen.	LONGUEURS D'ONDE, en millionièmes de millimètre. selon V. d. W.	selon Angström	NOMBRES de la figure de M. Kirchhoff.	INTENSITÉ et largeur selon le même.	SUBSTANCES correspondantes.
	23	523,50	523,7	1569,6	5 *c*	Fer.
	24	522,96	"	1577,5	"	
	25	518,63	518,8	1634,1	6 *g*	Magnésium.
b	26	517,51	517,7	1648,8	6 *f*	Magnésium.
	27 α	517,14	517,3	1653,7	6 *b*	Fer, nickel. Diffuse aux bords.
	27 β	517,07	517,2	1655,6	6 *c*	Fer, magnésium. Diffuse aux bords.
	27 γ	516,96	"	"	"	
	28	510,18	"	1760,4?	"	
	29	508,27	"	1777,4?	"	
	30	504,37	"	1834 ?	"	
	31	496,01	496,1	1961,0	4	Fer.
	32	489,38	489,5	2041,4	6 *b*	Fer. Double.
	33	487,46	487,4	2066,6	5 *c*	Fer. Double.
F	34	486,39	486,5	2080,0	6 *g*	Hydrogène.
	35	467,00	"	2309	"	
	36 α	453,75	"	2489,4?	"	
	36 β	453,39	"	"	"	
	36 γ	453,06	"	"	"	
	37	438,58	438,6	2721,2	6	Fer. Très-large.
	38	434,28	434,3	2798,6	6	Hydrogène. Diffuse, large.
	39	432,74	432,8	2821,9	6	Fer.
G	40	431,12	431,0	2854,4	6	Fer.
	41	427,52	427,5	"	"	Fer.
	42	426,27	426,2	"	"	Fer.
	43	422,87	422,9	"	"	Calcium. Double.
	44	414,55	414,7	"	"	Double.
	45	413,51	"	"	"	
	46	410,38	410,4	"	"	Hydrogène. La 4ᵉ, dans les étoiles du 1ᵉʳ type.
	47	407,95	407,5	"	"	Fer. Forte.
	48	406,75	406,6	"	"	Fer. Forte.
	49	404,79	404,8	"	"	Fer. Forte.
	50	403,61	"	"	"	
H_1	51 α	397,13	397,2	"	"	Calcium.
H_2	56 β	393,76	393,6	"	"	Calcium.

§ II. — *Comparaison de la lumière solaire avec les autres lumières. — Renversement des spectres.*

Le seul moyen d'arriver à connaître la nature et la cause des raies noires que nous observons dans le spectre du Soleil, c'est d'étudier à ce même point de vue les autres lumières, soit naturelles, soit artificielles. Cette étude est facile, et elle ne demande pas d'autre appareil que le spectroscope dont nous avons déjà parlé ; il suffit de mettre la source lumineuse en avant de la fente par laquelle on doit introduire les rayons. Mais, pour que la comparaison se fasse d'une manière parfaitement précise, on emploie le moyen suivant. On dispose un petit prisme devant la fente, de manière à la couvrir dans une moitié de sa longueur ; les faces de ce prisme réfléchissent la lumière dont on veut faire l'analyse, de manière à la diriger dans le tube de la lunette, parallèlement à son axe ; en même temps, un rayon de lumière solaire pénètre par la partie de la fente demeurée libre. Alors on voit dans le champ de l'appareil deux spectres distincts, mais juxtaposés : l'un produit par la flamme qu'on étudie, l'autre dû au rayon solaire. Comme les deux parties de la fente composent une seule et même ligne droite, les raies qui ont même indice de réfraction doivent occuper des positions identiques dans les deux spectres, et, par suite, elles doivent être rigoureusement sur le prolongement l'une de l'autre.

En suivant cette méthode, on est arrivé aux conclusions suivantes :

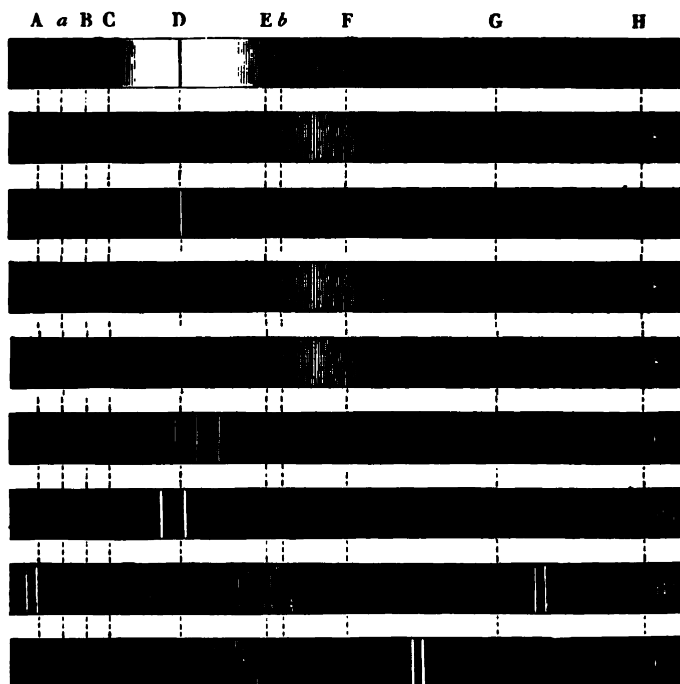
1° Supposons qu'on examine des corps simplement

incandescents, comme les charbons de l'arc voltaïque, un fil de platine traversé par un courant électrique, la chaux, la magnésie, la zircone échauffées par la flamme du gaz oxy-hydrogène, le charbon en suspension dans la flamme, etc., on obtient toujours un spectre continu, sans aucune raie noire ou brillante.

2° Toutes les fois qu'un corps, brûlant à la pression ordinaire, donne naissance à un composé gazeux, il produit une flamme dont le spectre est discontinu. Ainsi, la flamme d'une bougie présente toujours à sa base une partie bleuâtre, dans laquelle s'effectue la combinaison du carbone et de l'oxygène; cette partie donne un spectre discontinu, où l'on distingue trois groupes de raies vertes et bleues, nettement séparées les unes des autres et brillant d'un vif éclat. On observe le même phénomène dans la combustion des métaux. Le moyen le plus simple de constater ce fait, c'est de brûler du sodium en enflammant une dissolution alcoolique de sel marin; on obtient ainsi une ligne très-remarquable dans le jaune, ligne que l'on peut dédoubler avec des instruments un peu puissants. Le chlorure de cuivre, le nitrate de strontiane donnent des raies vertes et rouges qui servent à caractériser ces métaux. Les flammes ordinaires donnent une température généralement insuffisante; aussi emploie-t-on la lampe de Bunsen, ou mieux encore l'étincelle électrique. Pour utiliser ce dernier moyen, on a recours soit à une forte pile, soit à une bobine d'induction, et l'on fait jaillir l'étincelle entre deux rhéophores composés du métal qu'on veut étudier. Dans ces circonstances, pendant que la combustion ou la combinaison chimique s'effectue, *une même sub-*

stance donne toujours les mêmes raies lorsqu'elle se trouve à la même température. La *fig.* 96 fait voir les

Fig. 96.



raies principales qui se développent en brûlant des métaux alcalins : potassium (K), sodium (Na), lithium (L), strontium (Sr), calcium (Ca), baryum (Ba), rubidium (Rb), cæsium (Cs).

3° Si l'on fait varier la température ou le degré de combustion pour les corps composés, on obtient des spectres très-différents les uns des autres. Lorsqu'il s'agit des gaz, la pression à laquelle ils se trouvent au moment de la combustion exerce une très-grande

influence : quelques-uns de ceux qui donnent des raies à une faible pression donnent des spectres continus lorsqu'ils sont soumis à une pression très-considérable, résultat qu'on attribue à une température plus élevée. On essaye généralement les gaz en les amenant à un degré suffisant de raréfaction dans des tubes fermés connus sous le nom de *tubes de Geissler*, dans lesquels on fait passer la décharge d'une bobine d'induction. On remarque alors que la plupart d'entre eux donnent des spectres différents, suivant la tension de la décharge. Ainsi, l'azote donne un magnifique spectre cannelé lorsqu'on fait passer une étincelle ayant une tension assez faible. Mais, lorsqu'on introduit un condensateur dans le circuit, et que la tension de la décharge devient très-grande, alors le spectre est discontinu et composé de raies isolées, dont l'aspect est très-différent du précédent (Plücker). La même chose arrive pour l'oxygène, le carbone, le soufre, etc. Dans ces expériences, les gaz agissent à peu près comme des vapeurs métalliques; mais, en général, leur spectre est très complexe. Ainsi, l'hydrogène donne quatre raies principales, une dans le rouge, la seconde dans le bleu, et deux autres dans le violet; il présente en même temps un grand nombre de lignes plus faibles, dont l'intensité varie à mesure que la tension devient plus forte. Lorsque la pression est plus élevée, les raies vives indiquées ci-dessus s'étalent et deviennent des bandes (Wüllner), et enfin on finit pour avoir des spectres continus sous de très-fortes pressions (Frankland).

4° La plupart des métaux donnent des spectres discontinus, composés de quelques raies brillantes et

de larges bandes obscures; ces spectres sont donc inverses de celui du Soleil, dans lequel la partie lumineuse est celle qui domine. Il y a cependant quelques substances qui font exception et qui donnent un spectre composé d'un grand nombre de raies brillantes, le fer par exemple. Quelques métaux paraissent même donner un spectre continu dans lequel on remarque quelques raies brillantes; c'est ce qui arrive pour le magnésium brûlant à l'air. Mais, dans ce cas, le spectre continu provient de l'oxyde qui se forme, et qui, dès lors, agit à la manière des corps simplement incandescents.

5° Le résultat le plus surprenant est celui qu'on obtient en juxtaposant, comme nous l'avons indiqué, le spectre du Soleil et celui d'un métal. On trouve que, pour un bon nombre de substances, les raies brillantes correspondent exactement à certaines raies noires du spectre solaire. Ainsi, les raies caractéristiques du sodium coïncident d'une manière précise avec les raies D de Fraunhofer; les raies que l'hydrogène produit dans le rouge, dans le bleu et dans le violet, coïncident avec les raies C et F, et avec la 38e et la 46e de Van der Willingen (*voir* le tableau ci-dessus, § I); les raies principales du fer correspondent également à des raies bien déterminées de la lumière solaire. M. Kirchhoff a trouvé plus de soixante coïncidences, Angström en a trouvé jusqu'à 490. Dans le tableau inséré à la fin du paragraphe précédent, nous avons indiqué le nom des substances dont les raies correspondent à celles du Soleil; mais notre tableau est incomplet, et nous aurions pu y ajouter un grand nombre de métaux qui n'y figurent pas, si nous avions

pu tracer toutes les lignes. A présent, les raies dont la présence a été constatée dans le spectre solaire sont les suivantes, selon M. Angström :

Hydrogène	4
Sodium	9
Baryum	11
Calcium	75
Magnesium	4 + (3?)
Aluminium	2 (?)
Fer	450
Manganèse	57
Chrome	18
Cobalt	19
Nickel	33
Zinc	2
Cuivre	7
Titane	200

Ce résultat, inattendu et contraire à toutes les prévisions, piqua vivement la curiosité des physiciens; ils en cherchèrent avidement l'explication et ils ne tardèrent pas à la trouver. Foucault avait remarqué une singularité que présente la combustion du sodium. Ce métal donne d'ordinaire une ligne brillante correspondant à la raie D; mais, lorsqu'on le brûle en grande quantité, par exemple dans l'arc voltaïque, on voit, dans certaines circonstances, apparaître un spectre plus étendu et à peu près continu, dans lequel la ligne jaune est remplacée par une raie noire. Ce fait resta isolé et inexpliqué jusqu'au moment où Kirchhoff le rattacha à la théorie générale. Cette ligne noire était produite par l'absorption qu'exerçait la vapeur du sodium environnant le point lumineux.

On connaissait depuis longtemps des exemples d'ab-

sorption produite par des vapeurs. Par exemple, lorsque la lumière solaire a traversé une couche d'acide hypo-azotique ou de vapeur d'iode, elle donne des raies qui n'existaient pas auparavant. Ce fait s'observe également lorsqu'on regarde à travers ces gaz une flamme ordinaire dont le spectre est continu; les raies dues à l'absorption s'y produisent également, et il est bien plus facile de les reconnaître.

Les gaz qui composent notre atmosphère ont aussi une puissance d'absorption assez considérable; ils peuvent donc, en faisant disparaître certains rayons lumineux, donner naissance à quelques-unes des raies qu'on observe dans le spectre. Cette absorption atmosphérique étant d'autant plus grande que la lumière traverse une couche plus épaisse, le spectre doit varier avec la position du Soleil; les raies doivent être moins nombreuses lorsqu'il est près du zénith, plus abondantes lorsqu'il est près de l'horizon. Il est facile d'observer cette différence avec un simple prisme ou avec un spectroscope de poche de Hoffmann. La *fig.* 1, *Pl. I*, due à M. Janssen, donne une idée de ces variations pour la partie la moins réfrangible du spectre. Dans le rouge extrême, on voit se développer de larges bandes noires, qui n'existaient pas lorsque le Soleil était plus élevé. Dans l'orangé surtout, entre C et D, près de la raie 8 β de Van der Villingen, on voit se former une ligne nommée C^6 par Brewster (*fig.* 2, *Pl. I*), suivie de plusieurs traits parallèles entre eux. Entre C^6 et D, il se forme ordinairement un très-grand nombre de lignes, et quelques-unes de celles qui existaient déjà deviennent notablement plus larges. Au delà de D il se forme aussi une grande bande

nommée δ par Brewster. Pendant l'hiver, elle est composée de raies très-fines, mais en été elle devient très-sombre, et les différentes lignes qui la composent laissent à peine un intervalle entre elles. Enfin, on remarque un autre groupe dans le vert, à peu près au milieu de l'intervalle qui sépare *b* et F; le violet en contient également un certain nombre.

Quelques-unes de ces raies sont dues, sans aucun doute, aux gaz qui composent notre atmosphère; les groupes du vert, en particulier, appartiennent à l'azote. Celles qui se trouvent dans le jaune et dans le rouge sont presque exclusivement dues à la vapeur d'eau. Nous l'avons constaté en examinant ces spectres, dans différentes circonstances atmosphériques, en notant le moment où les raies apparaissent à mesure que le Soleil s'abaisse en approchant de l'horizon, et enfin en analysant pendant la nuit la lumière émise par des flammes situées à une grande distance. De plus, nous avons vu ces mêmes raies se manifester au moment où des nuages légers passaient devant le disque du Soleil, ce qui montre l'influence de la vapeur d'eau qu'ils contiennent. M. Janssen a confirmé notre explication en examinant la flamme d'un gaz à travers un tube rempli de vapeur d'eau à haute pression. Il pourrait cependant se faire qu'un certain nombre de raies soient dues à des substances encore inconnues, qui sont répandues en assez grand nombre dans notre atmosphère.

Un spectre peut donc être discontinu pour deux raisons bien différentes : 1° parce que, en réalité, les rayons émis par la source lumineuse ne sont pas continus : telle est la lumière des étincelles électriques et

celle des métaux volatilisés; 2° le spectre peut devenir discontinu par l'action absorbante d'une substance gazeuse ou d'une vapeur : les vapeurs métalliques étant très-absorbantes, comme nous l'avons vu pour le sodium, pourraient bien produire un résultat semblable dans la lumière solaire; Kirchhoff l'a vérifié avec de simples tubes, remplis de vapeur de sodium et avec la flamme de quelques autres métaux.

Le résultat le plus important de ces recherches, c'est qu'à une basse température, une vapeur absorbe précisément les rayons lumineux que la même substance émettrait si elle était incandescente. Ainsi, la vapeur de sodium produit, par son absorption, des raies noires à l'endroit précis où le même métal produit des raies brillantes pendant sa combustion. Ce fait généralisé constitue ce qu'on appelle le *renversement du spectre*, et on peut énoncer d'une manière générale le principe suivant : *Une vapeur absorbe précisément les rayons qu'elle est capable d'émettre lorsqu'elle est incandescente ; de sorte que le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant sont complémentaires l'un de l'autre*. Cette règle suppose toujours, comme condition essentielle, que la vapeur absorbante est à une température plus basse que celle du corps rayonnant.

La théorie physique de ces phénomènes est assez facile à établir par une simple comparaison entre l'optique et l'acoustique, comparaison à laquelle nous conduisent naturellement les idées actuelles, d'après lesquelles la lumière résulte des ondulations d'un fluide éthéré. Un grand nombre de corps sonores, à cause de leurs formes irrégulières, ne peuvent émettre que des bruits résultant d'une multitude de sons confus

et correspondant à des longueurs d'ondes différentes; il y en a d'autres, au contraire, qui, se trouvant dans de meilleures conditions, produisent des sons musicaux parfaitement précis et déterminés; ces sons musicaux sont produits par des vibrations toutes isochrones, et ils se propagent par des ondulations toutes de même longueur; ils sont tout au plus accompagnés de quelques harmoniques à la quinte, à l'octave, etc.

Il se produit quelque chose d'analogue pour les corps lumineux. Les corps simplement incandescents, retenus et gênés par des liens moléculaires, émettent des ondulations de toute nature et de toute longueur, dont les indices de réfraction prennent toutes les valeurs possibles entre deux limites extrêmes; de là résulte nécessairement un spectre continu. Les mêmes substances réduites en vapeur, délivrées en grande partie des entraves de la cohésion, vibrent avec plus de liberté, émettent des ondes lumineuses dont la longueur dépend uniquement de la masse vibrante et de sa force vive. Ces ondes sont en petit nombre et nettement définies; tout au plus sont-elles accompagnées de quelques autres ondulations que nous pourrions appeler *harmoniques* et dont les longueurs ont des rapports commensurables avec celle de l'onde principale. Par exemple, les raies C et F de l'hydrogène sont dues à des rayons dont les longueurs d'onde sont presque rigoureusement dans le rapport de 4 à 3, rapport qui caractérise en acoustique l'intervalle de l'*ut* au *fa;* la différence est seulement de $\frac{1}{81}$. La troisième raie du violet, comparée à la raie C, donne le rapport de $\frac{9}{8}$ à $\frac{5}{3}$, avec une différence également très-petite; en faisant abstraction de cette différence nous

aurions le rapport qui caractérise l'intervalle du *ré* au *la*. D'après M. Hinricks, si l'on étudie les différentes raies d'une même substance, on trouve que leurs longueurs d'onde peuvent être représentées par les termes d'une progression arithmétique; la raison de cette progression demeure constante pour un même groupe; elle peut toujours s'exprimer par un nombre assez simple, qui dépend de la forme et du volume des atomes.

Ces théories peuvent présenter quelques difficultés de détail, mais on ne saurait contester le principe général qui en est le fondement : les molécules parfaitement libres d'un gaz doivent vibrer d'une manière simple et nettement définie, absolument comme les corps de forme et de masse déterminées qu'on emploie en acoustique pour produire des sons musicaux d'une très-grande pureté.

Il arrive souvent que certains corps sonores, susceptibles de rendre des sons musicaux bien déterminés, se mettent en vibration *par sympathie*. Il suffit pour cela que, dans le voisinage, un instrument quelconque fasse entendre le son que ce corps est capable de produire, ou même l'une de ses harmoniques. C'est ainsi que les cordes d'une harpe ou d'un violon peuvent, sans avoir été directement ébranlées, se mettre à résonner sous la seule influence des ondes aériennes dont elles semblent comprendre le langage. Les molécules d'un gaz doivent éprouver quelque chose de semblable, relativement à la lumière. Lorsqu'elles sont frappées par des ondes éthérées, ces molécules demeurent le plus souvent indifférentes, parce qu'elles ne sont pas capables de vibrer à l'unisson.

Mais, s'il survient un mouvement vibratoire correspondant à la longueur d'onde qu'elles peuvent elles-mêmes produire, ou ayant avec cette longueur un rapport assez simple, elles en subiront immédiatement l'influence, comme les cordes sonores subissent l'influence des vibrations aériennes. Mais alors, les molécules ainsi ébranlées absorberont le travail de l'onde lumineuse qui les a frappées, et, le mouvement étant ainsi intercepté par le milieu qu'il avait voulu traverser, le rayon lumineux cessera de se propager et semblera s'éteindre. Une couche de molécules gazeuses peut donc absorber les rayons qui lui sont sympathiques, c'est-à-dire ceux qui correspondent à la longueur d'onde qu'elle-même peut produire en vibrant, ce qui revient à dire qu'une substance réduite à l'état de gaz ou de vapeur absorbe précisément les rayons que cette même substance est capable d'émettre lorsqu'elle est incandescente. Il est bien vrai que, par le fait même de cette absorption, la masse gazeuse augmente la force vive qu'elle possède, que sa température s'élève, et que, par suite, elle devient elle-même rayonnante, ce qui tend à substituer une raie lumineuse à la raie noire qu'elle produit. Mais la ligne noire ne pourra disparaître qu'au moment où la couche gazeuse aura acquis un éclat égal à celui de la source, condition difficile à remplir lorsque la masse de gaz présente une assez grande épaisseur.

Il peut arriver que l'absorption soit due à un gaz qui, au lieu de donner naissance à des ondes de même longueur que celles qui cherchent à le traverser, soit seulement capable de produire ce que nous pouvons appeler les *harmoniques* de ces mêmes ondulations.

Alors l'absorption ne sera pas complète, les raies ne seront pas parfaitement noires, mais leur teinte plus ou moins foncée tranchera toujours sur le reste du spectre.

La théorie que nous venons d'exposer est actuellement admise par les physiciens, et on peut dire qu'elle est confirmée par la différence qui existe entre l'absorption produite par les gaz et celle qui est due aux corps liquides ou solides. Dans le premier cas, les raies sont toujours nettes, franchement terminées et parfaitement isolées les unes des autres. Dans le second cas, au contraire, l'absorption produit de larges zones nébuleuses et mal terminées, qu'on ne peut réussir à partager en raies simples, distinctes les unes des autres. Ce résultat est évidemment dû à ce que les liens moléculaires, assez forts dans les solides et même dans les liquides, sont très-faibles ou à peu près nuls dans les gaz.

Les liens de la cohésion moléculaire ne sont pas les seuls qui contribuent à déterminer la nature de cette absorption; les liens de l'affinité chimique et l'état de combinaison exercent aussi une influence très-considérable. Ainsi, un simple mélange d'hydrogène et d'azote, comprimés de manière à occuper le même volume que le gaz ammoniac auquel ils pourraient donner naissance, absorbe une très-faible quantité de chaleur; il en est bien autrement de l'ammoniaque, qui, dans les mêmes circonstances, manifeste un pouvoir absorbant soixante fois plus considérable. On en peut dire autant de l'oxygène et de l'hydrogène: leur mélange possède un pouvoir absorbant beaucoup plus faible que celui de la va-

peur d'eau qui résulte de leur combinaison. En général, les gaz simples ont un pouvoir absorbant très-faible, et, par conséquent, ils émettent aussi fort peu de lumière, même lorsque leur température est très-élevée; c'est ce qui fait que le mélange d'oxygène et d'hydrogène donne une flamme très-pâle, quoique très-chaude.

Outre les radiations lumineuses, le Soleil émet aussi des radiations chimiques et thermiques; nous en parlerons plus tard. Appliquons maintenant à l'étude de la photosphère et de sa constitution les principes que nous venons d'exposer.

§ III. — *Application des principes précédents à la constitution de la photosphère solaire.*

Il est maintenant très-facile d'expliquer la présence des raies noires dans le spectre solaire. Ces lacunes ne sont autre chose que des raies d'absorption produites par des vapeurs métalliques faisant partie de l'atmosphère du Soleil.

Nous avons vu, dans le Chapitre précédent, que cet astre est environné d'une atmosphère dont la hauteur est égale à plusieurs diamètres terrestres; en nous appuyant sur des observations photographiques faites pendant les éclipses, et dont l'autorité est incontestable, nous pouvons affirmer que la hauteur de cette atmosphère est comprise entre la moitié et le tiers du rayon solaire. Nous y avons constaté directement la présence de l'hydrogène comme composant une couche rose qui enveloppe le Soleil de toutes parts et produit les protubérances. Si nous tenons compte de la tempé-

rature extrêmement élevée qui règne dans cette atmosphère, nous devons admettre qu'elle contient, à l'état de vapeurs, un grand nombre de substances métalliques que nous voyons ordinairement à l'état solide, par exemple le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, et même le fer et autres métaux peu fusibles. En partant de la loi du carré de la distance, nous sommes amené à conclure que la température du Soleil est de plusieurs milliers de degrés : nous verrons qu'elle est en réalité de plusieurs millions. Mais, même en nous arrêtant à cette limite inférieure, nous pouvons dire avec certitude que, dans ces circonstances, tous les métaux que nous venons de nommer sont réduits en vapeur. On connaît partout la fabrication de l'acier d'après le procédé de Bessemer. Ce procédé consiste à décarburer la fonte en lançant un courant d'air comprimé à travers la masse en fusion. Pendant cette opération, au moment même où l'on commence à souffler, la flamme donne naissance à un spectre continu ou présentant tout au plus les raies du sodium dues à des fragments de charbon ou à des poussières atmosphériques. Mais, lorsque l'opération touche à sa fin, le carbone étant presque complétement brûlé, et la température s'étant considérablement élevée, on voit de nouveau paraître les raies du sodium, puis le spectre perd peu à peu sa continuité, on voit se dessiner les raies brillantes du calcium, du magnésium, et surtout celles du fer. Le spectre est alors magnifique; outre les raies que nous venons d'indiquer, il en contient encore un grand nombre, provenant des substances qui se trouvent dans les minerais. La température qui se produit alors ne dé-

passe cependant pas 3000 degrés, et l'on peut conclure qu'il suffit de quelques milliers de degrés pour volatiliser les métaux les moins fusibles.

On est donc en droit d'admettre que l'atmosphère du Soleil contient des vapeurs métalliques, et que ces vapeurs, par leur pouvoir absorbant, donnent naissance aux lacunes qui constituent les raies de Fraunhofer. Cette induction n'est pas même nécessaire. Le seul fait de la coïncidence parfaite des raies du spectre solaire avec les raies brillantes des métaux, si nous nous en rapportons aux principes que nous avons exposés, prouve directement et d'une manière suffisante, l'action et par conséquent la présence des vapeurs métalliques dans le Soleil. Si nous partons de ces données, et si nous étudions les relations qui existent entre les raies du spectre solaire et les lignes brillantes qui caractérisent les différentes substances, nous arriverons à nous convaincre que le Soleil contient, à l'état de vapeurs, dans son atmosphère, le sodium, le magnésium, l'hydrogène, le calcium, le baryum, le fer, le chrome, le manganèse, le nickel, le cobalt, le cuivre, le zinc. Malgré les différences extrêmes qui existent entre leurs densités, ces vapeurs, en vertu de leur pouvoir diffusif, tendent à se mélanger entre elles, comme les gaz ordinaires. Cependant, nous trouverons les vapeurs très-lourdes plus abondantes dans les parties plus basses de cette enveloppe.

Cette théorie suppose qu'on admet deux hypothèses fondamentales : 1° au-dessous de l'atmosphère qui produit l'absorption, il existe une couche lumineuse qui, dans ses radiations, émet des rayons de toute

nature, et donne, par conséquent, naissance à un spectre continu; 2° l'enveloppe atmosphérique, dans laquelle se trouvent les métaux volatilisés, est à une température inférieure à celle de la couche lumineuse.

La première hypothèse peut s'entendre de deux manières. La photosphère peut être composée, comme nos nuages, d'une espèce de brouillard dû à la condensation des vapeurs métalliques; ce serait un amas de gouttelettes liquides, ou même d'une poussière solide extrêmement fine, possédant, en vertu de sa condensation même, un grand pouvoir émissif. Telle était l'idée de Wilson. On peut aussi penser que la photosphère est gazeuse comme le reste du corps solaire, mais que la forte pression à laquelle elle est soumise lui communique le pouvoir d'émettre des rayons de toute nature, et de donner ainsi naissance à un spectre continu. La première explication s'accorde mieux avec les apparences que présentent les taches et avec les observations que nous avons exposées dans les Chapitres précédents. La seconde repose sur l'hypothèse d'une forte pression dont l'existence semble loin d'être démontrée à la surface visible du Soleil, quoiqu'elle doive être considérable à une grande profondeur. En effet, il résulte de tous les travaux et de toutes les observations que l'atmosphère transparente du Soleil ne produit qu'une réfraction très-faible sur les rayons qui la traversent; il est bien difficile de concevoir que ce faible pouvoir réfringent se concilie avec une pression considérable. De plus, les raies de l'hydrogène ne restent fines qu'à la pression de 440 millimètres, au delà de laquelle elles

s'élargissent (Wullner); nous en déduisons que la couche visible du Soleil ne supporte pas une pression notablement plus grande. Il est bien vrai que, sur le Soleil, la pesanteur est vingt-huit fois plus grande qu'elle ne l'est à la surface de la Terre, mais il est possible aussi que la force expansive de la chaleur apporte une compensation plus que suffisante. Cette question demande évidemment à être éclaircie par des recherches ultérieures. Pour le moment, nous admettrons comme plus probable l'explication de Wilson.

Quant à la plus faible température de cette couche extérieure, elle est très-facile à justifier. La couche atmosphérique, étant la plus éloignée du centre, est aussi celle qui est la plus immédiatement exposée aux effets du rayonnement. Il est donc naturel qu'elle se refroidisse plus vite, et que sa température soit plus basse que celle des couches intérieures. Elle n'en reste pas moins gazeuse, vu sa température élevée et la nature des substances qui la composent, et quoiqu'une portion des vapeurs arrive à l'état de saturation et se condense, il en reste cependant une certaine quantité à l'état de fluide élastique, comme il arrive dans notre atmosphère pour la vapeur d'eau qui se trouve au-dessus des nuages.

D'après ce que nous venons de dire, la couche incandescente qui donne un spectre continu n'est autre chose que la photosphère elle-même; mais comme les rayons qui nous la font apercevoir doivent traverser l'atmosphère qui l'environne, quel que soit le point vers lequel on dirige le spectroscope, on trouve toujours un spectre discontinu, ou bien, si l'on examine les protubérances, un spectre à raies bril-

lantes. Mais, en étudiant avec plus de soin le bord du disque, nous avons réussi à voir une couche très-mince dont le spectre paraît continu. Comme cette découverte est très-intéressante, nous allons entrer dans quelques détails.

Nous avons employé une lunette de 25 centimètres d'ouverture, ayant un fort pouvoir grossissant, et montée équatorialement. A l'oculaire, nous adaptions un spectroscope ayant au moins trois prismes très-dispersifs. La fente étant parallèle au bord, nous réglions le mouvement d'horlogerie de la lunette, de manière à permettre au disque solaire de s'approcher peu à peu du champ de l'appareil. Alors nous avons pu constater les phénomènes suivants : 1° à une petite distance du bord, la lumière extérieure est assez vive pour donner naissance à un spectre rayé de noir, dans lequel on peut nettement distinguer les raies les plus fines; 2° la distance devenant encore plus faible, on voit paraître les raies brillantes des protubérances et de la couche rosée; 3° ces raies brillantes perdent leur intensité, et un moment arrive où toutes les raies noires disparaissent, à l'exception des plus fortes, telles que D et *b*; 4° la couche qui donne ainsi un spectre continu est extrêmement mince; on voit bien vite apparaître le spectre rayé de noir qui annonce le bord véritable du disque solaire.

Le phénomène observé dans la troisième phase ne peut s'expliquer que de deux manières : ou bien la couche que nous voyons est celle qui rayonne directement, et fournit un spectre discontinu; ou bien c'est elle qui renverse partiellement les lignes noires de certains métaux, comme la couche rose renverse celles

de l'hydrogène; dans cette dernière hypothèse, cette même couche ayant un pouvoir trop faible pour rendre brillantes les raies sur lesquelles elle agit, ne produirait qu'un renversement partiel, c'est-à-dire un effacement apparent des raies, comme il arrive pour l'hydrogène au delà des protubérances. La dernière hypothèse nous paraît la plus conforme à la vérité.

On ne doit pas s'étonner de voir persister les raies D et *b*, car ces vapeurs ont une faible densité et un grand pouvoir absorbant. Après l'hydrogène et les gaz proprement dits, ces corps sont ceux qui ont le poids spécifique le plus faible, et qui, par conséquent, à l'état de fluide élastique sont spécifiquement plus légers. Leurs vapeurs doivent donc s'élever à une très-grande hauteur, et comme elles sont très-absorbantes, elles devront, même en petite quantité, donner naissance à des lignes très-sombres et presque noires. L'expérience nous montre, en effet, que sous une épaisseur de quelques mètres seulement, la vapeur de sodium renverse le spectre si brillant de la lumière électrique. M. Lockyer a observé les raies directes de ces vapeurs dans quelques protubérances, comme nous avons observé celles du magnésium et du fer.

L'observation que nous venons de décrire est très-délicate et très-difficile, aussi exige-t-elle des circonstances exceptionnelles et de très-grandes précautions. L'image solaire doit être très-nette et parfaitement tranquille; on doit employer un grossissement considérable et se servir d'un spectroscope très-puissant.

Le phénomène que nous signalons ici est parfaitement d'accord avec ce que nous avons observé pendant l'éclipse de 1860. Après avoir vu disparaître le

bord solaire, nous signalâmes une couche atmosphérique très-blanche et très-brillante, puis ensuite apparurent la couche rosée et les protubérances. Or il paraît bien que cette partie brillante de l'atmosphère solaire, que nous avons aperçue entre la couche rose et le bord véritable du Soleil, est celle-là même qui donne actuellement le spectre continu.

On pourrait expliquer par là un fait observé par M. Rziha dans l'éclipse de 1868. Ce physicien a trouvé que la couronne, ou atmosphère solaire, donne un spectre continu (1). Or la mince couche dont nous parlons n'est que la partie la plus vive de la couronne, celle dans laquelle flotte la couche d'hydrogène. Cette substance, à cause de sa faible densité, s'élève au-dessus de toutes les autres; mais il est évident qu'elle ne forme pas, comme on l'a prétendu, la limite extrême de l'atmosphère solaire. Les formes définies et tranchées que présentent les protubérances prouvent que l'hydrogène qui les constitue flotte en suspension dans un gaz plus léger, mais qui exerce cependant une pression sensible. Les observations de la couronne pendant les éclipses prouvent d'ailleurs que l'atmosphère s'étend bien au delà des protubérances.

Jusqu'à présent, on n'est pas parvenu à reconnaître la substance à laquelle appartient la raie jaune qui brille dans le voisinage du point D. Qui sait si elle n'appartient pas à l'hydrogène dissocié, c'est-à-dire aux élements constitutifs de ce gaz? Les observations

(1) Le 7 août 1869, les astronomes américains ont vu, dans le vert, une raie brillante se détacher sur ce fond uniforme. Cette observation n'est pas en contradiction avec celle de M. Rziha.

ordinaires montrent que cette raie ne subit pas toujours les mêmes alternatives que les autres raies de l'hydrogène. Elle est souvent très-faible, tandis que, dans plusieurs circonstances, elle est bien plus vive et plus longue que la raie C elle-même, ce qui fait supposer une substance différente de l'hydrogène, mais au moins aussi légère que lui.

L'atmosphère solaire doit contenir toute espèce de vapeurs, comme nous l'avons déjà dit, mais cela n'empêche pas qu'elles s'élèvent à des hauteurs d'autant plus grandes qu'elles sont plus légères. C'est ce qu'on pourra reconnaître dans le tableau suivant, dans lequel les substances dont la présence a été signalée dans le Soleil sont rangées dans l'ordre croissant de leurs poids atomiques. Nous avons inséré dans ce tableau l'aluminium, le silicium et le potassium, quoique leur existence dans le Soleil ne soit pas parfaitement démontrée.

Hydrogène....	1	Chrome.......	52,0
Sodium.......	23	Manganèse	52,5
Magnésium....	24	Fer...........	56,0
Aluminium....	27	Cuivre........	63,5
Silicium	28	Zinc	65,0
Potassium.....	39	Baryum.......	137,0 ou 2 × 68,5
Calcium.......	40		

Si un grand nombre de corps, regardés comme simples par les chimistes, et particulièrement les métaux précieux, n'ont pas encore été reconnus dans le Soleil, il n'en faut pas conclure qu'ils ne s'y trouvent point; ce fait, purement négatif, peut provenir de ce que ces métaux, à cause de la densité considérable de leurs vapeurs, se trouvent retenus dans des

régions profondes et inaccessibles à l'analyse spectrale.

Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons toujours supposé que les substances qui existent dans cette région du Soleil ne peuvent donner que des spectres continus. Il est cependant bien possible qu'il y ait aussi des corps capables de donner directement des raies lumineuses échappant à toute absorption. On peut citer comme preuve de cette possibilité la raie jaune qui brille dans le spectre des protubérances. Cette raie existe, en réalité, dans le spectre ordinaire; elle brille même d'un éclat remarquable, ainsi que plusieurs autres situées dans le vert et dans le rouge. Nous ne pouvons entrer à ce sujet dans plus de détails; nous renverrons le lecteur aux Communications nombreuses que nous avons adressées à l'Institut de France, et qui ont été insérées dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* de 1868 et de 1869.

§ IV. — *Analyse spectrale des taches solaires. Conséquences relatives à la constitution du Soleil.*

Les procédés ordinaires de l'analyse spectrale nous font connaître l'ensemble des rayons qui émanent du Soleil après avoir traversé son atmosphère; mais on peut se demander si toutes les parties du globe solaire émettent des rayons identiques et donnent naissance à des spectres parfaitement semblables. Il semble bien difficile que, sur une surface d'une aussi grande étendue, il y ait une homogénéité complète, et naturellement la pensée se reporte sur les taches; on est porté

à se demander si ces régions, si différentes des autres à tant de points de vue, ne doivent pas aussi offrir des particularités remarquables relativement aux radiations qu'elles nous envoient.

Nous avons essayé de résoudre ce problème, et, pour cela, nous avons cherché à obtenir des images des taches aussi amplifiées que possible. Nous avons employé à ces observations notre grand équatorial de Merz. En plaçant à une petite distance du foyer un objectif achromatique d'un microscope d'Amicci, nous obtenions une image du Soleil, qui, projetée sur un écran, aurait eu 22 ou 23 centimètres de diamètre; l'image des taches se présentait alors avec une grandeur remarquable, et, par une coïncidence très-heureuse, le nombre des taches ayant été considérable pendant les mois d'avril et de mai 1869, nous avons pu les étudier attentivement à ce point de vue particulier, et suivre avec succès les différentes phases qu'elles présentent. L'image des taches acquérait quelquefois plus de 1 centimètre de diamètre, de sorte qu'en limitant par des diaphragmes la longueur de la fente à 2 millimètres environ, on pouvait explorer successivement les différentes parties de l'ombre et de la pénombre. Nous avons employé des prismes très-puissants, dont le nombre a varié de trois à cinq. Les mesures étaient prises soit avec une échelle graduée sur verre et adaptée à l'oculaire, soit à l'aide de fils micrométriques. Dans la suite de notre travail, toutes les raies ont été comparées avec les figures de Kirchhoff, mais ici nous les rapporterons à celle de Van der Villingen que nous avons déjà reproduite.

Voici les résultats auxquels nous sommes parvenu, et qui, nous sommes heureux de le dire, ont été en très-grande partie confirmés par M. Lockyer :

1° En dirigeant le spectroscope vers les différentes régions du disque solaire on trouve partout les mêmes raies principales. Quant aux raies secondaires, nous ne pouvons pas être aussi affirmatif; elles s'évanouissent en certains endroits, mais leur disparition peut être l'effet d'un plus grand éclat que présente la lumière en ces points. Cependant, auprès du bord, on remarque des variations considérables. Plusieurs systèmes de lignes très-fines, qu'on aperçoit difficilement au centre, deviennent alors très-visibles; elles présentent en même temps un aspect indécis et comme nébuleux, leurs bords ne sont pas nettement terminés. Pour faire avec rigueur une étude comparative, il faudrait parvenir à juxtaposer les spectres de deux points du disque éloignés l'un de l'autre; on s'assurerait par là si les différences tiennent seulement à l'intensité de la lumière ou à la position des raies. Il nous a été impossible d'employer un instrument qui donnât ce résultat, mais nous avons constaté qu'une simple diminution de l'intensité lumineuse ne peut pas produire un effet semblable; ce résultat est donc uniquement dû à l'influence de la couche atmosphérique plus épaisse que les rayons traversent près du bord. Les raies D surtout sont tellement diffuses, qu'il est impossible de ne pas reconnaître là un effet dû à l'absorption.

2° Dans le voisinage des taches, et principalement sur les facules qui les environnent, les raies de l'hydrogène sont toujours plus faibles; quelquefois elles

disparaissent complétement et finissent même par se renverser. La raie C est celle qui subit les plus grandes variations. La raie F ne disparaît jamais complétement; elle est accompagnée d'une autre ligne noire qui n'appartient pas à l'hydrogène. Ces phénomènes s'expliquent parfaitement maintenant. Nous avons vu que, dans le voisinage des taches, il y a ordinairement d'énormes protubérances composées de gaz hydrogène; ces protubérances nous donneraient des raies brillantes si elles étaient isolées, mais inondées comme elles le sont par l'éclatante lumière du Soleil, elles parviennent à peine à produire un effet égal à l'absorption de la couche environnante. Lorsqu'elles sont assez brillantes, elles peuvent produire un effet plus considérable et donner réellement naissance à des raies brillantes, ce qui se présente assez fréquemment.

Lorsqu'une tache est près du bord, on voit très-souvent les raies brillantes de l'hydrogène empiéter sur le disque solaire lui-même, et se prolonger de plusieurs secondes jusqu'au noyau obscur; là elles s'arrêtent brusquement. Cependant, lorsqu'un pont traverse le noyau, et surtout lorsqu'il y a des voiles rouges dans les noyaux, on y retrouve la raie C renversée ou du moins très-réduite.

3° Dans l'intérieur des taches, le spectre subit une profonde modification. Toute l'harmonie et le rapport des intensités lumineuses se trouvent changés. Certaines lignes, qui d'ordinaire sont à peine visibles, deviennent très-noires et très-larges; d'autres deviennent indécises sur les bords; d'autres enfin restent sans aucun changement. Il est évident que de semblables modifications ne sauraient être attribuées à une simple

diminution dans l'intensité lumineuse; nous sommes donc en présence d'une absorption spéciale et élective produite par certaines substances qui se trouvent dans l'intérieur des taches. Il y a donc là des phénomènes bien tranchés et que nous allons essayer d'analyser.

A. On distingue dans le spectre plusieurs systèmes de raies très-fines, très-serrées, également distantes les unes des autres; on a donné à ces systèmes le nom de *persiennes*, à cause des apparences qu'ils présentent. Dans les taches, ces raies deviennent diffuses et nébuleuses, comme on peut le voir près des raies 6, 7, 8, 9 de la figure de Van der Willingen, et dans le voisinage des raies 14, 15. Les systèmes de raies qui se forment en ces endroits ont une intensité graduellement croissante ou graduellement décroissante; elles sont assez distinctes, mais nébuleuses. Dans la région du vert, il y en a un très-grand nombre qui deviennent très-noires dans les taches, tandis que, pour les parties plus lumineuses du Soleil, on ne les distingue que très-difficilement. Ces systèmes ne paraissent cependant pas être des créations nouvelles tout à fait particulières aux taches; ils correspondent ordinairement à des raies très-faibles indiquées par Kirchhoff; mais ces lignes prennent dans les taches un développement extraordinaire, ce qui constitue un phénomène bien tranché et complétement caractéristique. On ne connaît pas encore les substances qui produisent ces persiennes, mais il paraît qu'elles sont gazeuses; la vapeur d'eau en produit de semblables et quelquefois à la même place.

B. Plusieurs raies métalliques se dilatent d'une manière considérable, tout en conservant leurs bords

nettement tranchés. Il est très-facile de constater cet élargissement dans les raies 10, 11, 12 de Van der Willingen. Dans le vert, il y en a qui deviennent trois ou quatre fois plus larges lorsque les taches sont rondes et profondes. Nous avons constaté ce phénomène sur un très-grand nombre de raies, qu'il serait trop long d'indiquer ici. Nous dirons seulement que pour celles du calcium et du fer, le fait est plus saillant.

C. Les raies du sodium s'élargissent aussi, mais, contrairement aux autres, elles deviennent diffuses sur les bords et véritablement nébuleuses. Il est cependant difficile de voir s'il y a une modification proprement dite de la raie métallique elle-même, ou bien si ce n'est pas un résultat dû à l'action d'une cause étrangère, comme il arrive à ces mêmes raies lorsque le Soleil est près de l'horizon, et que, par conséquent, l'atmosphère terrestre exerce une influence plus considérable. Dans le vert, nous avons encore des raies qui deviennent diffuses, surtout entre *b* et E.

D. Les raies métalliques s'élargissent graduellement depuis le bord extérieur de la pénombre jusqu'au noyau, de sorte que leurs extrémités se terminent en pointe effilée (*fig.* 97).

Fig. 97.



4° Outre ces modifications caractéristiques que présentent les raies, on voit aussi varier l'intensité lumineuse des différentes parties du spectre, surtout dans

le rouge, le jaune et le vert. On voit se former des bandes sombres, surtout entre les points B et C et dans le voisinage de D ; on en voit une auprès de la raie 16, une autre auprès du point 8, et un très-grand nombre entre 20 et 17. Ces variations d'intensité sont faciles à constater, mais difficiles à évaluer, car elles ne présentent rien de bien défini ; le phénomène est cependant incontestable, et il est indépendant de l'élargissement des raies noires, car l'espace compris entre 9 et 13 demeure très-brillant, malgré l'élargissement des raies du calcium et du fer.

5° Malgré l'absorption très-considérable qu'on observe dans l'intérieur des taches, il y a des raies qui restent parfaitement brillantes, sans éprouver la moindre variation dans leur intensité. Leurs positions correspondent à des intervalles indiqués par Kirchhoff comme ne contenant aucune raie. Ces positions, sur la figure que nous avons reproduite, se trouvent à peu près entre 14 et 15, entre 16 et 17, 17 et 18, 19 et 20, 21 et 22.

6° Il y a une grande analogie entre l'absorption qui se produit dans l'intérieur des taches et celle qu'on observe lorsque le Soleil est près de l'horizon ; mais les lignes nouvelles qui se produisent et celles qui s'élargissent ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Ainsi, la raie C^6 de Brewster, qui devient très-large lorsque le Soleil est à l'horizon, est invisible dans les taches. Cependant la bande qui se trouve au delà du point D, et que Brewster a désignée par la lettre δ, quoique produite par l'atmosphère terrestre, existe cependant indépendamment de cette même atmosphère, car, lorsque le Soleil s'approche de l'horizon,

on la voit paraître sur les noyaux des taches, alors qu'elle est encore invisible sur tous les autres points du disque. Nous croyons aussi que les raies nébuleuses comprises entre 7 et 8 sont dues à la vapeur d'eau, car elles sont fortement renforcées lorsque le Soleil est à l'horizon; elles le sont même par un simple cirrus passant devant le disque solaire.

Les phénomènes que nous venons d'analyser prouvent donc bien que les taches sont des régions où l'absorption s'exerce plus puissamment, et le renforcement des raies qui se produit au bord du disque dépend évidemment de la même cause. Il y a cependant une différence entre ces deux absorptions, car, pendant qu'auprès du bord on remarque surtout une absorption qui paraît due à des gaz proprement dits, on observe dans les taches l'absorption propre aux métaux. Lorsque les taches sont superficielles, on voit simplement se renforcer les raies D. Lorsqu'elles sont de profondeur moyenne, les raies du calcium se renforcent également, mais on ne voit aucun changement dans celles du fer. Enfin, lorsque les taches sont très-profondes, les raies du fer subissent à leur tour une dilatation considérable, mais moindre que celles du calcium. Le fond des taches serait donc occupé par des vapeurs métalliques assez denses, par exemple celles du fer et du calcium. Ainsi le sodium et le calcium, dont le poids atomique est plus faible, sont aussi ceux dont les raies s'élargissent davantage. Les autres métaux, le cobalt, le chrome, le plomb, ne présentent pas de changements notables, ce que nous attribuons à la densité de leurs vapeurs. En réfléchissant sur tous ces phénomènes, on est conduit à admettre que, dans

l'intérieur des taches, les vapeurs métalliques sont disposées par ordre de densité, les plus lourdes au fond, les plus légères à la partie supérieure, et au-dessus de tout le gaz hydrogène, enveloppant entièrement le globe solaire, et produisant des jets lumineux que nous désignerons sous le nom de *protubérances*.

De l'ensemble de ces faits, il résulte encore une conclusion très-importante. Puisque, dans les taches, le spectre ne présente pas de raies nouvelles, mais seulement les raies de l'atmosphère solaire plus ou moins renforcées, nous devons croire qu'il n'y a point là de nouvelles substances, mais seulement une densité plus considérable dans certaines vapeurs. Or nous savons qu'il y a, dans les taches, une dissolution continuelle de matière photosphérique; il devrait en résulter une absorption élective toute spéciale, si la photosphère contenait d'autres éléments que ceux qui constituent l'atmosphère elle-même. Il faut donc en conclure que la photosphère est composée de nuages ou de brouillards dus à la condensation des vapeurs atmosphériques; c'est le seul moyen d'expliquer ce fait capital, qu'en se dissolvant dans les taches, la photosphère ne donne naissance à aucune raie nouvelle. Cette conclusion vient à l'appui de l'hypothèse faite par Wilson et adoptée par Herschel sur la nature de la photosphère.

De tout ce qui précède, nous pouvons encore conclure que la profondeur des taches ne peut servir de mesure à l'épaisseur de la photosphère, comme on l'a cru jusque dans ces derniers temps. Ce qu'on mesure ainsi, c'est l'épaisseur de la couche absorbante et plus

dense qui occupe les parties les plus basses des taches. De même que sur la Terre nous voyons des gaz plus lourds que l'air, l'acide carbonique par exemple, former un air irrespirable dans certaines cavités, en particulier dans la grotte du Chien, près de Naples, de même il arrive que, dans le Soleil, les vapeurs métalliques, malgré leur tendance à la diffusion, occupent le fond des cavités qui constituent les taches. Ce qui n'empêche pas que ces gaz pesants ne se mêlent un un peu par *diffusion* au reste de l'atmosphère, comme font, dans notre air atmosphérique, l'acide carbonique et la vapeur d'eau.

Enfin, la partie noire qui occupe l'intérieur des taches ne peut être constituée ni par le noyau central et obscur du Soleil, ni par des scories ou autres matières solides flottant à la surface d'un liquide; cette obscurité est due à des masses *transparentes*, mais fortement *absorbantes* de vapeurs métalliques, qui, grâce à leur densité considérable, occupent les parties les plus basses des inégalités existant à la surface de la photosphère, et remplissent les vides et les interstices que laissent quelquefois entre eux les nuages brillants qui nous éclairent.

On pourrait, à la rigueur, donner le nom de *nuages* à ces masses absorbantes; mais, d'après ce que nous venons d'exposer, ce nom s'applique beaucoup mieux à la matière photosphérique, car il me paraît certain que c'est elle qui, n'étant pas transparente, émet des rayons de toute nature, comme les solides incandescents. Il est bien possible cependant qu'au-dessous de la photosphère il y ait des gaz dont la lumière donne également un spectre continu, à cause de l'é-

norme pression qu'ils supportent et de la température élevée à laquelle ils sont soumis. Il résulte en effet des récentes expériences de M. Frankland que, dans ces circonstances, tous les gaz deviennent brillants et donnent naissance à un spectre continu.

D'après une opinion précédemment exposée, les taches seraient des cavités produites par des émanations de gaz venant de l'intérieur, avec une température plus élevée, et dissolvant, en raison de cette température, une partie de la photosphère. Cette opinion, déjà appuyée de raisons sérieuses, acquiert un très-haut degré de probabilité par les observations des facules et des protubérances, puisque ces appendices ne peuvent être produits que par des jets de gaz sortant de la masse intérieure du Soleil. On a même cherché à évaluer la vitesse avec laquelle l'hydrogène est mis en mouvement dans le voisinage des taches et dans les protubérances, et cette vitesse serait supérieure à 30 kilomètres par seconde. Mais les observations qui conduisent à ce résultat peuvent s'expliquer d'une autre manière, et il faut attendre qu'on ait fait d'autres recherches.

Maintenant que nous avons une connaissance suffisante de l'atmosphère solaire, nous pouvons espérer de répondre aux deux questions suivantes .

1° Pourquoi le spectre solaire ne présente-t-il pas les raies caractéristiques des métaux précieux, l'or, le platine, etc.?

La réponse est facile. Le poids spécifique de ces vapeurs est tellement considérable, qu'elles doivent se trouver ensevelies à une grande profondeur. Nous avons vu les métaux les plus légers surnager, pour

ainsi dire; de même, les plus lourds doivent tomber au fond, et être, par conséquent, invisibles pour nous.

2° Pourquoi n'observons-nous pas dans le Soleil l'oxygène, l'azote et les autres gaz qui, cependant, doivent y exister aussi bien que sur la Terre ?

Cette question est plus difficile à résoudre que la précédente, aussi ne prétendons-nous pas y répondre d'une manière définitive. Hasardons simplement une conjecture. Les gaz ont tous plusieurs spectres, différents les uns des autres suivant la température à laquelle ils se trouvent. Qu'on prenne un tube de Geissler, composé de deux parties, l'une ayant un diamètre assez considérable, l'autre ayant une section capillaire; on observe dans ces deux parties deux spectres différents pour un même gaz; Plücker les a appelés des spectres de premier et de second ordre. On observe ce fait pour le brome, le chlore et l'hydrogène. L'azote présente trois spectres très-nettement définis. Il arrive quelquefois que, pour des températures intermédiaires, deux spectres d'ordre différent se superposent l'un à l'autre. Mais, en général, les spectres du premier ordre sont peu brillants, et par conséquent ils ne se détacheraient pas d'une manière suffisante sur le fond brillant du Soleil. De plus, si on excepte l'hydrogène, il faut une température très-élevée pour obtenir le spectre de second ordre, le seul qui présente des raies très-vives analogues à celles des vapeurs métalliques; l'étincelle électrique, qui suffit pour donner le spectre des métaux, est rarement capable de produire le spectre de second ordre. Par conséquent, pour que nous reconnaissions la présence d'un gaz

dans le Soleil, il faut qu'il y soit porté à une température très-élevée; mais il est bien possible que, dans l'enveloppe extérieure, la température ne soit pas suffisante pour donner naissance aux spectres de second ordre. L'hydrogène, lui-même, donne le spectre qui correspond à une température modérément élevée; les raies terminées en pointe qu'on observe dans certains cas montrent qu'il éprouve un refroidissement dans la couche la plus éloignée du centre et au sommet des protubérances. Dans ce cas, l'absorption, réduite à celle des spectres de premier ordre, est trop faible pour être sensible; elle donne simplement lieu à des bandes plus ou moins diffuses, qu'il est impossible de distinguer d'un très-grand nombre de raies dues à des substances inconnues.

On ne peut cependant pas dire que l'oxygène fasse complétement défaut; nous avons reconnu dans les taches des traces de vapeur d'eau; il y a donc de l'oxygène. Il est possible que dans les protubérances, toujours plus élevées auprès des taches, l'hydrogène se refroidisse en s'élevant à une grande hauteur, et qu'il arrive ainsi à la température à laquelle peut s'effectuer sa combinaison avec l'oxygène; la vapeur d'eau ainsi formée retomberait de manière à entretenir une véritable circulation. Il est possible que l'azote existe également, et qu'il donne naissance aux lignes sombres qui bordent la raie C à l'extérieur du Soleil; car cette raie doit lui appartenir, si elle n'est pas due au carbone.

La spectrométrie est une science encore au berceau; il faut donc éviter de tirer de ses indications des conclusions précipitées, et c'est pour cela que nous

croyons devoir mettre un terme à nos conjectures. Nous pouvons cependant espérer que le spectroscope nous permettra un jour de déterminer avec quelque exactitude non-seulement la composition chimique, mais encore la température du Soleil, car chaque substance a une température déterminée à laquelle elle produit un spectre avec des raies particulières.

En attendant ce résultat, auquel on ne peut manquer d'arriver, étudions cette température par les moyens qui sont à notre portée.



CHAPITRE IX.

TEMPÉRATURE SOLAIRE. — SON ORIGINE. — SA CONSERVATION.

Il semble au premier abord que ce soit chose facile de déterminer la température du Soleil, mais pour peu qu'on y réfléchisse on reconnaîtra que cette entreprise présente de très-grandes difficultés. Il ne suffit pas, en effet, d'exposer un thermomètre au Soleil, de lire le nombre de degrés qu'il indique, et d'augmenter ce nombre proportionnellement au carré de la distance; car : 1° ce nombre est relatif à notre zéro conventionnel correspondant à la température de la glace fondante : il n'a aucun rapport avec le zéro absolu que les physiciens ont fixé à — 273 degrés centigrades; 2° les radiations solaires nous arrivent à travers l'atmosphère, et elles éprouvent dans ce passage une absorption dont il est nécessaire de tenir compte; les recherches faites à ce sujet portent à conclure que suivant la verticale notre atmosphère absorbe un quart des rayons calorifiques que le Soleil nous envoie; pour les rayons obliques, cette absorption augmente proportionnellement à la sécante de la distance zénithale; 3° enfin, outre la radiation solaire, un thermomètre ainsi exposé reçoit les radiations des corps environnants, et cette circonstance complique singulièrement la question.

Pour déterminer complétement la température solaire, il faut connaître : 1° l'intensité de la radiation; 2° la quantité absolue de force vive thermique que le Soleil communique à la Terre dans un temps donné. Nous allons montrer comment on peut évaluer ces éléments; nous en tirerons ensuite les conséquences relatives à la constitution physique du Soleil et à la conservation de son énergie.

§ I. — *Mesure de l'intensité de la radiation solaire.*

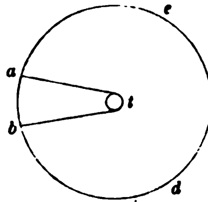
La radiation d'un corps est proportionnelle à sa température, ou à la force vive moléculaire de ses radiations thermiques. On la mesure en déterminant la température à laquelle parvient un corps exposé au Soleil, et en comparant cette radiation avec celles que lui communiquent d'autres corps portés à une température connue.

Lorsqu'un corps est exposé au Soleil, les corps environnants rayonnent vers lui; il s'établit ainsi un échange de radiations entre le thermomètre et l'enceinte dans laquelle il se trouve renfermé, tous les corps rayonnant les uns vers les autres. Lorsque l'équilibre est établi, l'intensité relative des températures que possèdent les parties rayonnantes est en raison inverse de la surface des différentes parties de l'enceinte, cette surface étant estimée suivant sa grandeur angulaire vue du corps qui reçoit les radiations. Ainsi, soit *aedb* (*fig.* 98) une enceinte de surface Σ ayant un excès de température θ sur le corps thermométrique *t*; soit S une portion *ab* de cette surface

ayant un excès T; on aura la relation

$$TS = \Sigma\theta, \quad \text{d'où} \quad T = \theta\frac{\Sigma}{S}.$$

Fig. 98.



Cette équation est toujours vraie, pourvu cependant que la surface $S = ab$ soit une portion assez petite de l'enceinte, et que, par suite, elle soit négligeable par rapport à l'enceinte tout entière.

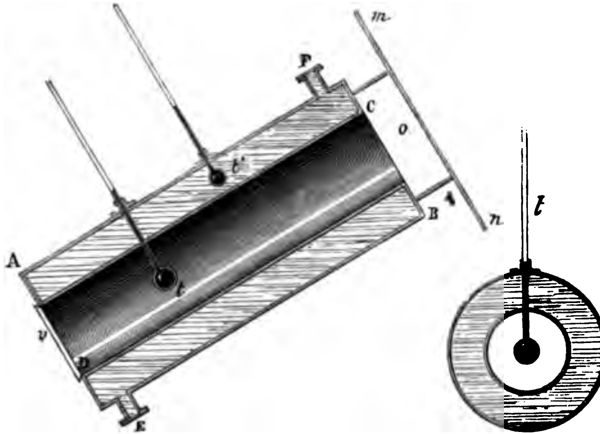
Cette théorie une fois admise, on pourra facilement déterminer la température du Soleil, et l'exprimer en prenant pour unité les degrés conventionnels du thermomètre. Pour cela, on exposera un thermomètre au Soleil dans une enceinte de température connue, on lira l'indication θ° donnée par la colonne mercurielle, et on multipliera ce nombre par le rapport qui existe entre la surface de la sphère et la surface apparente du Soleil. Or le disque solaire ayant un diamètre moyen de $31'3'',6$, on trouve le rapport de $\frac{\Sigma}{S} = 183960$, et on peut bien négliger l'étendue du disque par rapport à la surface entière de la sphère. On aura donc $T = 183960\theta$.

La *fig.* 99 représente l'appareil que nous avons employé à Rome pour déterminer la valeur de θ. Il est semblable à celui que M. Waterston a employé

aux Indes, et à celui dont M. Soret s'est servi dernièrement sur le mont Blanc.

AB et CD (*fig.* 99) sont deux cylindres concentriques

Fig. 99.



soudés l'un à l'autre; ils forment une espèce de chaudière dont la capacité annulaire peut être remplie d'eau ou d'huile à une température quelconque. On peut même chauffer l'appareil par un courant de vapeur entrant par la tubulure E, sortant par la tubulure F. A la place de la vapeur on peut employer un gaz, par exemple l'air chaud qui s'échappe de la cheminée d'une lampe. Un thermomètre *t* passe par une tubulure à travers l'espace annulaire et pénètre jusqu'à l'axe du cylindre; il reçoit les rayons solaires qui sont introduits par un diaphragme *mn* dont l'ouverture *o* est à peine plus grande que la boule du thermomètre. Un verre épais *v* ferme la partie postérieure de l'appareil et permet de s'assurer que le thermomètre est bien placé

sur la direction du faisceau de rayons. Le cylindre intérieur et le thermomètre t sont recouverts de noir de fumée. Un second thermomètre t' donne la température de l'espace annulaire, et par conséquent celle de l'enceinte. Tout l'appareil est monté sur un support ayant un mouvement parallactique, afin de suivre avec plus de facilité le mouvement diurne du Soleil.

L'appareil ayant été exposé au Soleil, comme nous l'avons dit, on observe les deux thermomètres; leur différence de température s'élève graduellement, et au bout de quelque temps elle finit par devenir constante. Alors on note les deux températures, et on en fait la différence $t - t' = \theta$. C'est cette valeur qu'on introduit dans l'équation citée plus haut. On est arrivé ainsi aux résultats suivants :

1° Dans un grand nombre d'observations faites à Rome sous une pression moyenne de 758 millimètres, à une hauteur de 52 mètres au-dessus du niveau de la mer, la différence des deux températures a été de 12°,06; dans les journées où le ciel était plus pur, elle s'est élevée à 14 degrés.

2° La différence reste constante, quelle que soit la température de l'enceinte, de sorte que, pour $t' = 0°$, on a $t = 12°,06$; pour $t' = 60°$, $t = 72°,06$. Ce résultat peut paraître surprenant, mais nous l'avons vérifié avec soin depuis zéro jusqu'à 64 degrés; M. Waterston a même été jusqu'à 220 degrés en faisant circuler de l'air chaud dans l'appareil. La conclusion théorique qui en résulte, c'est que la surface du disque solaire peut être négligée par rapport à la surface de la sphère.

3° Lorsqu'on observe en différentes saisons, près

du méridien, on obtient des résultats bien moins variables qu'on n'aurait pu l'attendre; la moyenne oscille, pendant l'hiver, entre 11°,5 et 12 degrés; pendant l'été entre 12°,5 et 14 degrés. Cette variation est très-faible surtout si l'on remarque que, d'une saison à l'autre, la hauteur du Soleil varie de 47 degrés. Mais dans une même saison la hauteur du Soleil exerce une influence bien plus considérable; lorsqu'elle est de 27 ou 30 degrés pendant l'été, la différence des deux températures s'élève à peine à 6 degrés. Il y a donc une cause qui modifie d'une saison à l'autre la transmission des rayons calorifiques, car cette hauteur est précisément celle que le Soleil atteint au méridien pendant l'hiver. Cette cause consiste surtout dans la vapeur d'eau, qui est beaucoup plus abondante en été, et qui produit à elle seule une absorption à peu près égale à celle que l'atmosphère produit pendant l'hiver. Du reste, cette explication est parfaitement confirmée par les expériences de Tyndall et par celles du professeur Garibaldi, de Gênes, sur la force absorbante de la vapeur d'eau.

4° En opérant à une plus grande hauteur au-dessus du niveau de la mer, on obtient des différences plus considérables. Ainsi, à Genève, M. Soret a trouvé, pour une altitude de 400 mètres, la valeur moyenne $\theta = 15°,5$; à l'altitude de 2500 mètres, il trouva 18°,6; au sommet du mont Blanc, à l'altitude 4800 mètres, il trouva 21°,13. Sous le ciel plus pur des Indes, le Soleil se trouvant à une hauteur de 70 degrés, M. Waterston a trouvé 27°,8.

On le voit, lorsque les physiciens cherchent à résoudre ce problème si curieux de la température du

Soleil, ils trouvent sur leur chemin des difficultés bien grandes. Aussi ne prétendons-nous pas exprimer cette température par un nombre précis ; nous fixerons seulement la plus petite valeur qu'on puisse lui attribuer, et la question sera ainsi résolue d'une manière bien suffisante.

Supposons donc exacte la valeur trouvée par Soret au sommet du mont Blanc ; nous aurons alors $T = 21,13 \times 183960 = 3987075$ degrés centigrades, c'est-à-dire près de 4 millions de degrés. Mais ce nombre est évidemment trop petit, car il faut tenir compte de l'absorption atmosphérique. Pour cela, en appliquant les lois connues, on doit ajouter à la différence donnée par les expériences de Soret, le nombre 7°,89. Alors $\theta = 29°,02$, et $T = 5334840$ degrés, ou, en nombres ronds, cinq millions et un tiers.

Telle serait la température d'un corps placé sur le Soleil. Il est bien vrai que ce résultat n'est pas seulement dû aux radiations de la surface ; les couches superposées jouissant d'une assez grande transparence, leurs actions s'ajoutent l'une à l'autre ; mais il n'en est pas moins vrai que ce serait là l'indication d'un thermomètre placé dans la couche superficielle, indication qui exprime évidemment la température de cette couche elle-même.

Si l'on voulait partir du zéro absolu, il faudrait ajouter 273 au nombre trouvé ; cette modification, comme on le voit, serait bien insignifiante.

On trouverait une température bien plus élevée encore, si l'on partait de la valeur $\theta = 27$ degrés trouvée par M. Waterston avant d'appliquer la correction relative à l'absorption atmosphérique ; aussi

ne connaissons-nous la température du Soleil qu'à quelques millions de degrés près, et M. Waterston pense qu'on peut l'évaluer à 9 ou 10 millions de degrés.

Remarquons enfin que les radiations ainsi évaluées sont celles qui ont traversé l'atmosphère solaire dont l'absorption totale éteint la moitié des rayons émis par la masse incandescente; aussi, en fixant comme limite inférieure 5 ou 6 millions de degrés, nous sommes certain qu'on ne peut pas nous accuser d'exagération : mais, en réalité, sa valeur ne peut être inférieure à 10 millions de degrés.

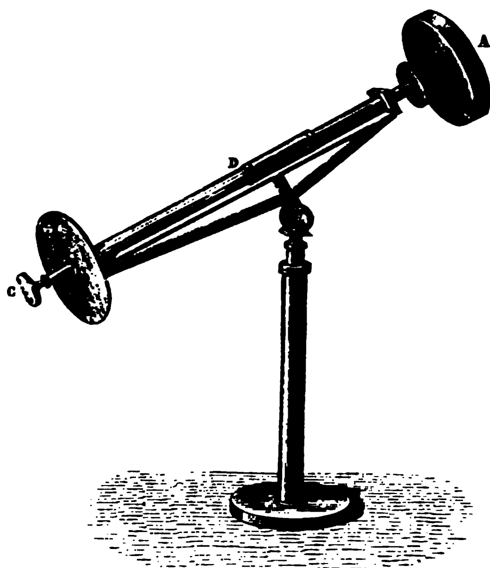
Pour donner une idée de cette température, nous ferons une seule remarque. En tenant simplement compte de la distance, cette température est 46 215 fois plus élevée que celle à laquelle peut parvenir un corps situé à la surface de la Terre, par son exposition aux rayons du Soleil. Pour produire le même effet, il faudrait concentrer sur un espace de 1 centimètre carré les rayons qui tombent sur une surface de 4^{mq},6. Or les lentilles à échelons, qui n'ont qu'un mètre et absorbent beaucoup de rayons, sont cependant capables de volatiliser la plupart des substances connues. Qu'on juge par là des effets que peut produire la température du corps solaire.

§ II. — *Quantité absolue de chaleur émise par le Soleil.*

Dans le paragraphe précédent, nous avons exprimé la température du Soleil en degrés conventionnels. Pour évaluer la radiation de cet astre, il faut l'ex-

primer en quantité absolue de chaleur, en rapportant cette quantité à une unité déterminée de travail thermique. Ce travail est mesuré par l'échauffement produit pendant l'unité de temps dans une masse ayant un poids déterminé et une capacité calorifique connue. L'appareil qu'on emploie à cet effet a été imaginé par M. Pouillet. Il consiste (*fig.* 100) en un

Fig. 100.



cylindre de cuivre très-mince A, noirci à sa surface ou base antérieure que l'on dirige perpendiculairement aux rayons solaires. Le cylindre est rempli d'eau, et l'on en détermine la température au moyen d'un thermomètre T.

Cet appareil étant exposé au Soleil, on note l'accroissement de température qui se produit en une

minute, et l'on introduit cette donnée dans le calcul. On a soin de tenir compte du vase; pour cela on multiplie son poids par sa chaleur spécifique, et l'on ajoute le nombre ainsi obtenu au poids de l'eau sur laquelle on opère. De plus, il faut bien remarquer que, tout en s'échauffant, l'appareil perd de la chaleur par rayonnement. Pour tenir compte de cette cause d'erreur, on fait une seconde expérience, dans laquelle on détermine la quantité dont la température du cylindre s'abaisse en une minute, en l'abritant contre le rayonnement direct; on ajoute le nombre ainsi déterminé à celui qu'on a trouvé dans la première expérience, et la somme représente l'échauffement définitif de la masse. Cette compensation n'est pas parfaitement exacte, mais, si on veut une précision extrême, les savants ont à leur disposition des moyens de correction plus parfaits pour arriver au résultat.

D'après les expériences, 1 gramme d'eau exposé au rayonnement solaire sur une surface de 1 centimètre carré, s'échauffe en une minute de $1°,763$. On peut en déduire la quantité totale de chaleur qui tombe sur l'hémisphère terrestre. Elle est égale à la radiation comprise dans la section d'un cône circonscrit à la Terre et au Soleil, cette section étant faite tout près de la Terre; c'est à peu près la surface d'un grand cercle, et par conséquent le quart de la surface terrestre. Par conséquent, la radiation solaire pourrait en une minute échauffer de $\frac{1°,763}{4}$ ou de $0°,4403$ une couche d'eau ayant 1 centimètre d'épaisseur, et uniformément répandue sur toute la surface

de la Terre. Dans une année, cette même couche s'échaufferait de

$$0°,4403 \times 60 \times 24 \times 365,25 = 231\,580 \text{ degrés},$$

en supposant nulles les pertes dues à l'évaporation et à la radiation. Si l'épaisseur était de 1 mètre, la température s'élèverait en une année de 2 315°,80.

Les physiciens aiment à exprimer cette quantité de chaleur par l'épaisseur de la couche de glace qu'elle ferait fondre pendant le même temps; on la détermine en divisant le nombre déjà trouvé par la chaleur latente de fusion de la glace. On trouve ainsi que la radiation solaire serait capable de faire fondre dans *une année* une couche de glace ayant $30^m,89$, ou à peu près 31 mètres d'épaisseur.

Nous pouvons maintenant évaluer la quantité de chaleur émise à la surface même du Soleil, en multipliant la valeur précédente par le carré de la distance du Soleil à la Terre exprimée en rayons du globe solaire. On trouve ainsi que cette quantité de chaleur peut en une minute élever de 816°,71 la température d'une couche d'eau de 1 mètre d'épaisseur, ou de fondre dans le même temps une couche de glace de $10^m,7$.

La théorie moderne de la chaleur regarde l'activité thermique comme un travail mécanique; elle nous fournit le moyen d'évaluer en force la radiation solaire et même de remonter à sa source primitive.

Nous venons de voir que le Soleil peut, en une minute, échauffer de 816°,71 une couche d'eau ayant 1 mètre d'épaisseur, ou, ce qui revient au même, échauffer de 1 degré une couche de $816^m,71$ ou en-

fin une couche de 13^{m},61 en une seconde. Cette force est la même sur toute la surface du Soleil, mais pour plus de simplicité nous considérerons seulement les effets qu'elle produit sur une surface de 1 mètre carré. Alors le poids de l'eau ainsi échauffée de 1 degré pendant une seconde sera de 13610 kilogrammes. Or la force mécanique capable d'élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau équivaut à 424 kilogrammètres, chaque kilogrammètre étant le travail nécessaire pour élever un poids de 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur. Ainsi donc, pour obtenir en kilogrammètres l'expression de la puissance thermique du Soleil, il faut multiplier 13 610 par 424, et le produit 5 791 840 exprime le nombre de kilogrammètres cherché : ce travail équivaut à celui de 77 232 chevaux-vapeur, le cheval-vapeur étant la force capable de produire en une seconde un travail de 75 kilogrammètres.

On voit donc qu'il suffirait de la chaleur dépensée sur quelques mètres carrés pris à la surface du Soleil pour faire fonctionner toutes les machines à vapeur qui existent sur notre globe. Une des plus grandes machines qui aient été construites, celle de la frégate *le Friedland*, qui figurait en 1867 à l'Exposition universelle de Paris, avait une force de 4000 chevaux, et exigeait, pour produire la vapeur qui lui était nécessaire, huit chaudières tubulaires brûlant environ cinq tonnes de charbon par heure.

On pourrait aussi évaluer la puissance mécanique à laquelle équivaut la radiation totale de la surface solaire. On trouverait ainsi un nombre de chevaux-vapeur égal à 470 trillions, c'est-à-dire 470×10^{18}.

Telle est l'immense puissance qui émane du Soleil et dont il nous est impossible de nous faire une idée exacte. Nous pouvons bien aligner un nombre suffisant de chiffres pour la représenter, mais ce nombre ne dit rien à notre imagination, qui est impuissante à le concevoir.

§ III. — *Des pertes de force vive qu'éprouve le Soleil.*

Nous venons d'évaluer l'immense quantité de chaleur qui émane à chaque instant du Soleil, et les nombres que nous avons déterminés mesurent les pertes d'énergie que subit pendant chaque seconde cette masse incandescente. Cela fait, on est naturellement conduit à se demander s'il est possible que, malgré un rayonnement aussi considérable, le Soleil ait une température constante, et quelles sont les sources de chaleur qui peuvent compenser des pertes aussi considérables.

Il faut d'abord remarquer que la radiation ne se produit qu'à la surface; il est donc bien possible qu'à l'intérieur la température soit encore plus élevée. Mais les masses refroidies par le rayonnement se mélangeant sans cesse avec les autres, le globe solaire pris dans son ensemble perd réellement de la chaleur, et le problème de la constance de température reste toujours à résoudre.

Pour évaluer exactement l'abaissement de la température solaire, il faudrait connaître ce qu'on appelle dans le langage des physiciens sa *capacité calorifique*, ou du moins faire à ce sujet une hypothèse

plausible. On sait, en effet, que pour une même quantité de chaleur ou de force vive, les corps ne s'échauffent pas également. Par exemple, la quantité de chaleur qui élèvera seulement de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau suffira pour échauffer de 9 degrés un égal poids de fer. Il résulte évidemment de cette propriété que, pour deux masses égales, mais de natures différentes, la durée du refroidissement sera proportionnelle à leurs capacités calorifiques. Ainsi donc, à masse égale, et en partant d'une même température, le fer se refroidira neuf fois plus vite que l'eau.

Pour le Soleil, il nous est impossible d'assigner rigoureusement sa capacité pour la chaleur, car nous ne connaissons pas exactement les matériaux dont il est composé. Mais nous savons qu'il est composé d'hydrogène et de vapeurs métalliques. A part l'hydrogène dont la chaleur spécifique est 3,41, celle de l'eau étant 1, toutes les autres vapeurs ont une capacité inférieure à 0,5. Nous ne saurions donc admettre, pour capacité moyenne, un nombre plus grand que l'unité, et nous pouvons au plus prendre ce nombre comme limite supérieure.

On peut connaître avec plus de précision la surface du Soleil, son volume, sa masse, sa densité moyenne.

La surface, exprimée en mètres carrés, est représentée par le nombre

$$6032900000000000000 = 60329 \times 10^{14}.$$

Le volume, exprimé en mètres cubes, est représenté

par le nombre

$$1\,393\,350\,000\,000000\,000000\,000000 = 139\,335 \times 10^{22}.$$

La densité de l'eau distillée étant prise pour unité, celle du Soleil est 1,42, et son poids, exprimé en kilogrammes, est représenté par le nombre

$$M = 1\,946\,600\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 19\,466 \times 10^{26};$$

ou, en nombre rond, deux quintillions de kilogrammes.

Nous avons vu qu'en une minute, sur 1 mètre carré, il émet une quantité de chaleur capable d'élever de 816°,71 la température de 1 mètre cube ou de 1000 kilogrammes d'eau, ce qui représente 816 710 calories (1). Il en résulte que, pendant une année, chaque mètre carré perd un nombre de calories égal à 429 552 000 000, ce qui fait pour la surface entière une quantité $C = 25\,914 \times 10^{26}$.

Supposons que la capacité moyenne de la masse solaire pour la chaleur soit égale à celle de l'eau : le nombre M exprimera les calories que doit perdre le Soleil pour que sa température s'abaisse de 1 degré : C étant le nombre de calories qu'il perd en une année, l'abaissement annuel de température sera $\frac{C}{M} = 1°,33$. Le résultat deviendrait 2°,8 si le Soleil avait une capacité calorifique égale à celle de la vapeur d'eau, et,

(1) On appelle *calorie*, en Physique, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0 à 1 degré centigrade la température de 1 kilogramme d'eau.

par conséquent, un peu supérieure à celle des vapeurs métalliques.

On voit déjà que l'intérieur du Soleil ne saurait être ni obscur ni solide. Si nous le supposions incandescent comme le fer fondu, à une température de 2 000 ou 3 000 degrés, il suffirait pour abaisser sa température à zéro d'une période bien plus courte que les époques historiques les mieux connues.

On ne saurait non plus admettre qu'il est composé d'une matière combustible capable de produire en brûlant autant de chaleur que le charbon. Dans cette hypothèse, d'après les calculs de M. Thomson, il se serait éteint au bout de huit mille ans, même en supposant que les produits de la combustion ne dussent pas en arrêter l'activité.

Or il est incontestable que pendant toute la durée des temps historiques l'action du Soleil a été sensiblement ce qu'elle est maintenant; elle n'a pas diminué d'une manière appréciable. Les êtres vivants, soit animaux, soit végétaux, qui se trouvent à la surface du globe sont depuis longtemps les mêmes, et leurs variations ont été peu considérables; ce fait est incompatible avec un abaissement notable de la température solaire. Il est donc impossible d'admettre que la chaleur du Soleil est due à une combustion, ou à la radiation d'une masse simplement incandescente.

Du reste, pour expliquer la constance de la température solaire, on ne peut faire que deux hypothèses, celle d'une activité intérieure, et celle d'une action extérieure, complétement différente de la combustion proprement dite. Herschel avait supposé des courants électriques capables de produire de la lu-

mière, comme dans nos aurores boréales; mais nous savons maintenant que ces courants électriques eux-mêmes doivent avoir une cause; ils ne sauraient prendre naissance spontanément; ils doivent être produits par une force qui elle-même ne peut être créée de rien; leur existence doit être expliquée par les lois de la Physique.

Nous allons exposer les hypothèses les plus importantes qui ont été imaginées jusqu'à présent, et nous tâcherons d'assigner la cause véritable qui produit la chaleur du Soleil et maintient sa température constante. Nous ne prétendons pas cependant que cette constance soit absolue; car même en faisant abstraction des variations périodiques constatées par les observateurs, nos moyens d'observation sont trop imparfaits, et surtout nous avons des données trop incomplètes sur les époques déjà passées pour pouvoir émettre une opinion aussi nettement tranchée. Supposons, en effet, que la température solaire soit de 6 millions de degrés, et qu'elle diminue chaque année de $2^{\circ},8$; au bout de 4000 ans la diminution serait de 11 200 degrés, c'est-à-dire $\frac{1}{536}$. La radiation à la surface de la Terre, au niveau de la mer, étant au plus de 15 degrés, comme nous l'avons vu, aurait diminué dans le même rapport, c'est-à-dire de $0^{\circ},028$, quantité évidemment inappréciable dans nos observations. Nous examinerons donc le phénomène en lui-même et dans ses éléments physiques en attendant que la théorie ou l'observation nous donnent des renseignements plus précis.

§ IV. — *Sources de chaleur extérieures au Soleil.*

Le problème dont nous cherchons la solution n'est pas nouveau. Newton déjà, considérant les pertes immenses de matière que le Soleil devait éprouver par l'émission continuelle de particules lumineuses et calorifiques, chercha une source dont l'action fût capable de compenser la radiation solaire. Il supposa que les comètes pourraient bien être destinées à cet usage ; en tombant sur le Soleil elles alimenteraient sa combustion et empêcheraient sa masse de diminuer. A cette époque on attribuait aux comètes des masses considérables, et de plus la radiation lumineuse était considérée comme une émission de particules matérielles ; l'hypothèse de Newton était donc admissible, car elle expliquait les phénomènes d'après les principes connus et les théories admises. Il n'en est plus de même aujourd'hui. Nous savons que les comètes possèdent des masses très-faibles, et nous regardons la lumière et la chaleur, non comme une émission proprement dite, mais comme un mouvement vibratoire qui se communique par l'intermédiaire d'un milieu impondérable.

Ce que Newton disait de la masse du Soleil, nous pouvons le dire de la force vive qu'il possède ; sa masse ne diminue pas par la radiation, mais le mouvement dont ses particules sont animées doit diminuer incessamment, s'il n'y a pas des sources abondantes pour réparer les pertes qu'il éprouve. C'est le docteur Mayer, de Heilbronn, qui a le premier formulé ce problème au point de vue mécanique, et c'est lui aussi qui

en a le premier cherché la solution, solution qui a changé complétement la théorie admise jusque-là. L'hypothèse de Mayer a été développée par Waterston, Thomson, Joule; nous en donnerons ici les résultats, du moins pour ce qui concerne notre sujet.

Le docteur Mayer, considérant la quantité de matière qui tombe annuellement sur la Terre, sous forme d'aérolithes ou d'étoiles filantes, et la quantité de chaleur due à la transformation de leur force vive, a été conduit à se demander si un phénomène semblable ne pourrait pas se produire dans le Soleil, et il s'est demandé quelle masse de matière devrait être employée à compenser ainsi la diminution de force vive produite par la radiation.

Le problème ainsi posé peut être résolu à l'aide des notions ordinaires de la Mécanique. Il est facile de calculer la vitesse que doit acquérir un corps partant des limites de l'espace, ou d'une distance infinie, pour tomber sur le Soleil; on peut donc connaître la force vive qu'il possédera en arrivant à la surface de cet astre. On trouve ainsi que sa vitesse est celle qu'il acquerrait en tombant d'un mouvement uniformément accéléré d'une distance égale au rayon solaire; cette vitesse est de 915 kilomètres par seconde. Un kilogramme d'eau, en tombant ainsi sur le Soleil, produirait par son choc une quantité de chaleur capable d'élever sa propre température de 1000 millions de degrés. Si la Terre venait à tomber sur le Soleil, elle produirait une quantité de chaleur égale à celle qu'il perd en soixante-neuf ans par le rayonnement. Une masse de fer qui tomberait ainsi des profondeurs de l'espace sur la Terre développerait une

quantité de chaleur suffisante pour que sa propre température s'élevât à 1 350 000 degrés; aussi pourrait-elle se volatiliser complétement.

Il faut remarquer que les choses ne se passent pas tout à fait comme nous le supposons ici. La chaleur produite par le choc n'est pas tout entière concentrée dans le corps qui tombe; la Terre en absorbe nécessairement une partie; une autre partie est employée à échauffer l'air et à le mettre en mouvement. On comprend cependant comment les aérolithes deviennent incandescents par leur frottement contre l'air atmosphérique et par la compression qu'ils exercent sur lui, et comment ils arrivent à la Terre couverts d'une couche de matière fondue et vitrifiée : c'est pour la même raison qu'une partie de ces corpuscules se volatilisent complétement, et prennent l'aspect d'étoiles filantes.

On peut évaluer aussi en force dynamique la chaleur que la Terre reçoit du Soleil, et on arrive au résultat suivant : supposons que la Terre, devenue immobile dans son orbite et obéissant à la seule force de gravitation, tombe vers le Soleil. Supposons, de plus, que l'attraction du Soleil soit constante, et qu'en conséquence elle produise un mouvement uniformément accéléré, analogue à celui que nous observons dans la chute des corps pesants. Au bout d'un jour, la Terre aurait ainsi parcouru un espace égal à trois fois et demie son rayon, et sa vitesse serait représentée par sept rayons terrestres. Supposons qu'alors un choc vienne à l'arrêter brusquement. La force vive qu'elle possédait sera transformée en mouvement vibratoire, et la quantité de chaleur ainsi produite sera

cent fois moindre que celle qu'elle reçoit journellement de la radiation solaire.

Le principe de la conversion de l'énergie en chaleur constitue une des plus belles découvertes de la science moderne; il reste à voir jusqu'à quel point on peut l'appliquer au Soleil. Que des météores tombent sur le Soleil aussi bien que sur la Terre, rien n'est plus facile à admettre; c'est même d'autant plus probable qu'il s'agit d'une masse très-considérable et bien plus capable que la Terre de faire dévier les corps de leur direction primitive. Il est également certain que si un corps semblable tombe à la surface du Soleil il doit y produire trois mille fois plus de chaleur que n'en produirait en brûlant une masse égale de charbon. On pourrait même appuyer cette théorie par des faits qui semblent la confirmer. Ainsi, en Angleterre, M. Hodginson et M. Carrington, dans deux observatoires différents, virent au même instant une lumière très-vive se développer en un point du Soleil très-voisin d'une tache; ils attribuèrent ce phénomène à la chute d'un météore et à la chaleur qui en était la conséquence. La comète de 1843 traversa, sans doute, l'atmosphère solaire et s'y enflamma en donnant naissance à cette queue prodigieuse de 63 degrés! Nous savons maintenant que les comètes et les étoiles filantes sont des météores de même nature.

Mais, en réalité, voici comment la question doit être posée. Ces faits, qui sont absolument possibles, existent-ils réellement? Peut-on expliquer ainsi la constance de la température solaire? Pour qu'il en fût ainsi, il devrait en moyenne tomber toutes les heures un kilogramme de matière sur chaque mètre

carré. Supposons que cette substance ait une densité simplement égale à celle de l'eau; au bout d'un an, elle formerait à la surface du Soleil une couche ayant 10 mètres d'épaisseur, ce qui n'est pas absolument impossible et serait insensible pour nous, car en suivant cette proportion il faudrait quatre mille ans pour qu'il se produisît une augmentation d'une seconde, dans le diamètre solaire, augmentation qui serait passée inaperçue, vu le peu de précision des mesures les plus anciennes. Mais nous ne saurions faire le même raisonnement pour l'accroissement de la masse; dans le même intervalle de quatre mille ans elle s'accroîtrait de $\frac{1}{5000}$ et, d'après les calculs de M. Thomson, en deux mille ans le mouvement de la Terre se trouverait retardé de $\frac{1}{8}$ d'année, résultat inconciliable avec les données les plus certaines de l'Astronomie. Pour répondre à cette difficulté, on pourrait admettre que la matière qui tombe ainsi sur le Soleil se trouve à l'intérieur de l'orbite terrestre, et que c'est elle qui donne naissance à la lumière zodiacale. Mais cette hypothèse est inadmissible, car nous connaissons un grand nombre de comètes périodiques ayant une partie de leur orbite dans cette région intérieure, lesquelles devraient éprouver une grande résistance de la part de cette matière météorique; la forme de leur trajectoire et la vitesse de leur mouvement devraient se trouver complétement modifiées. Mais l'observation ne signalant aucune de ces perturbations, il faut en conclure que ces comètes ne rencontrent dans leur mouvement aucune masse appréciable qui puisse les faire dévier de leurs orbites.

Les considérations que nous venons d'indiquer

cent fois moindre que celle qu'elle reçoit journellement de la radiation solaire.

Le principe de la conversion de l'énergie en chaleur constitue une des plus belles découvertes de la science moderne; il reste à voir jusqu'à quel point on peut l'appliquer au Soleil. Que des météores tombent sur le Soleil aussi bien que sur la Terre, rien n'est plus facile à admettre; c'est même d'autant plus probable qu'il s'agit d'une masse très-considérable et bien plus capable que la Terre de faire dévier les corps de leur direction primitive. Il est également certain que si un corps semblable tombe à la surface du Soleil il doit y produire trois mille fois plus de chaleur que n'en produirait en brûlant une masse égale de charbon. On pourrait même appuyer cette théorie par des faits qui semblent la confirmer. Ainsi, en Angleterre, M. Hodginson et M. Carrington, dans deux observatoires différents, virent au même instant une lumière très-vive se développer en un point du Soleil très-voisin d'une tache; ils attribuèrent ce phénomène à la chute d'un météore et à la chaleur qui en était la conséquence. La comète de 1843 traversa, sans doute, l'atmosphère solaire et s'y enflamma en donnant naissance à cette queue prodigieuse de 63 degrés! Nous savons maintenant que les comètes et les étoiles filantes sont des météores de même nature.

Mais, en réalité, voici comment la question doit être posée. Ces faits, qui sont absolument possibles, existent-ils réellement? Peut-on expliquer ainsi la constance de la température solaire? Pour qu'il en fût ainsi, il devrait en moyenne tomber toutes les heures un kilogramme de matière sur chaque mètre

carré. Supposons que cette substance ait une densité simplement égale à celle de l'eau; au bout d'un an, elle formerait à la surface du Soleil une couche ayant 10 mètres d'épaisseur, ce qui n'est pas absolument impossible et serait insensible pour nous, car en suivant cette proportion il faudrait quatre mille ans pour qu'il se produisît une augmentation d'une seconde, dans le diamètre solaire, augmentation qui serait passée inaperçue, vu le peu de précision des mesures les plus anciennes. Mais nous ne saurions faire le même raisonnement pour l'accroissement de la masse; dans le même intervalle de quatre mille ans elle s'accroîtrait de $\frac{1}{5000}$ et, d'après les calculs de M. Thomson, en deux mille ans le mouvement de la Terre se trouverait retardé de $\frac{1}{8}$ d'année, résultat inconciliable avec les données les plus certaines de l'Astronomie. Pour répondre à cette difficulté, on pourrait admettre que la matière qui tombe ainsi sur le Soleil se trouve à l'intérieur de l'orbite terrestre, et que c'est elle qui donne naissance à la lumière zodiacale. Mais cette hypothèse est inadmissible, car nous connaissons un grand nombre de comètes périodiques ayant une partie de leur orbite dans cette région intérieure, lesquelles devraient éprouver une grande résistance de la part de cette matière météorique; la forme de leur trajectoire et la vitesse de leur mouvement devraient se trouver complétement modifiées. Mais l'observation ne signalant aucune de ces perturbations, il faut en conclure que ces comètes ne rencontrent dans leur mouvement aucune masse appréciable qui puisse les faire dévier de leurs orbites.

Les considérations que nous venons d'indiquer

suffisent pour détruire l'hypothèse météorique; aussi cette théorie est-elle actuellement abandonnée par ses partisans et même par ses plus ardents promoteurs. Cependant, si elle n'explique pas d'une manière complète la persistance de la température solaire, elle ne laisse pas d'avoir quelque valeur. Un certain nombre de météores doivent nécessairement tomber sur le Soleil et y produire une quantité déterminée de chaleur. Appliquée à la Terre, cette même théorie pourrait donner l'explication de quelques phénomènes encore obscurs, elle pourrait par exemple rendre raison de l'accélération séculaire de la Lune. En effet, si la masse de la Terre s'accroît constamment par les aérolithes qui tombent à sa surface, son mouvement de rotation doit se ralentir, et celui de la Lune doit paraître s'accélérer. Pour que cette explication fût plausible, il suffirait qu'il tombât chaque année une quantité de matière capable de couvrir la surface de la Terre de l'épaisseur d'un dixième de millimètre. Cette condition n'est peut-être pas impossible, puisque le nombre des étoiles filantes est très-considérable, et qu'il tombe souvent des aérolithes pesant plusieurs milliers de kilogrammes. D'ailleurs la masse du Soleil n'est pas connue avec une très-grande précision. Il y a quelques années encore, on la regardait comme égale à 354936 fois la masse de la Terre; mais comme on a reconnu la nécessité d'augmenter la parallaxe de $\frac{1}{28}$ de la valeur admise, on a dû représenter la masse par le nombre 326800.

Le mérite incontestable de l'hypothèse de Mayer, c'est d'expliquer l'origine de la chaleur solaire, en la

réduisant à n'être plus qu'un effet de la gravitation considérée comme une simple force mécanique. Les astronomes admettent maintenant que notre système solaire résulte de la condensation d'une nébuleuse. Toute la matière qui compose actuellement le Soleil et les planètes se trouvait jadis à l'état de matière cosmique répandue dans les espaces immenses qu'embrasse le système solaire; elle constituait donc une véritable nébuleuse analogue à celles que nous voyons encore dans plusieurs parties du ciel. Herschel, qui a étudié ces nébuleuses, a reconnu qu'elles se présentent à différents degrés de condensation; leurs formes sont très-différentes, irrégulières, globulaires, elliptiques, annulaires; la matière dont elles sont composées est dans un état complet de dissociation, et nous apprenons par le spectroscope qu'elles sont, pour la plupart, complétement gazeuses. Or la masse qui constitue notre système solaire, en la supposant diffusée seulement jusqu'à l'orbite de Neptune, se présenterait dans un état de raréfaction comparable à celui que produisent nos meilleures machines pneumatiques.

Si nous supposons qu'une pareille masse vienne à se condenser en se précipitant sur un point central, nous pourrons parfaitement appliquer la théorie de Mayer. Le choc réciproque des molécules mettra toute la masse en vibration thermique, et développera au centre une quantité très-considérable de chaleur. En tenant compte de la masse et de la manière dont elle a dû être primitivement répartie à différentes distances du Soleil, on a calculé que la quantité de chaleur développée de cette manière a dû élever la

température à 500 millions de degrés. Telle aurait donc été la température initiale du globe solaire; aussi celle que nous observons aujourd'hui ne serait qu'un faible résidu de l'énorme quantité de chaleur due à la seule gravitation.

Il faut bien remarquer que cette théorie ne suppose rien relativement au mode de condensation, ni à la rapidité avec laquelle elle a dû avoir lieu. Il n'est pas nécessaire, pour expliquer l'élévation de température, d'admettre que le choc s'est produit en un temps très-court. La condensation a pu être très-lente, et développer cependant une grande quantité de chaleur. Aussi, en supposant que le Soleil se contracte actuellement, cette contraction, en produisant une véritable chute vers le centre, doit compenser une partie de la force vive qui est perdue par le rayonnement.

On doit, sans doute, rapporter à la même origine la chaleur centrale des planètes, et très-probablement aussi leur énergie de translation. Cette énergie n'est que les $\frac{2}{3}$ de celle qu'elles acquerraient en tombant sur le Soleil, et celle-ci suffirait pour compenser les pertes produites en quarante-cinq mille ans par la radiation.

Telles sont les conclusions auxquelles conduit la théorie de Mayer, conclusions actuellement admises par les physiciens. La théorie météorique a été incapable de rendre compte des phénomènes qu'elle prétendait expliquer, mais elle a eu cependant un résultat très-avantageux : elle nous a fait connaître l'origine de la chaleur solaire, source universelle de la vie dans notre système planétaire. Il nous reste à

expliquer avec quelques détails les conséquences de la haute température que possédait primitivement le Soleil, et à montrer comment cet astre peut se suffire à lui-même pendant un long intervalle de temps sans que nous puissions remarquer de variations appréciables dans son état calorifique.

§ V. — *Constance de la radiation solaire; son explication.*

Lorsque le Soleil, à l'époque de sa formation, eut atteint un volume sensiblement égal à celui qu'il possède aujourd'hui, sa température, ainsi que nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, aurait été au moins égale à 500 millions de degrés. De plus, l'expérience nous apprend qu'à sa surface la température est, actuellement encore, de plusieurs millions de degrés; il est très-probable que dans l'intérieur elle est encore plus élevée. Il faut conclure de ces faits que le Soleil ne saurait être composé d'une masse solide; et même, quelle que soit l'énorme pression qui existe dans cette masse, elle ne saurait, à proprement parler, se trouver à l'état liquide; nous sommes nécessairement conduit à la regarder comme gazeuse, malgré son état de condensation extrême. Déjà nous avons été amené à cette conclusion (Ch. V, § III), alors que, sans discussion, on admettait l'existence d'un noyau solide et obscur.

Dans l'intérieur du globe solaire, l'effet dû à la gravitation étant extrêmement considérable, il doit en résulter un état gazeux bien différent de tout ce que nous connaissons sur la Terre. D'un côté une

pression énorme doit favoriser l'affinité; mais de l'autre, la température est tellement élevée, qu'aucune combinaison proprement dite ne peut subsister, si ce n'est à la surface où la radiation peut abaisser la température d'une manière suffisante. Les différents corps simples peuvent, en effet, rester l'un en présence de l'autre sans se combiner, malgré leur affinité réciproque : on dit alors qu'ils sont *dissociés*.

D'après les belles découvertes de M. H. Sainte-Claire Deville, nous savons que les flammes contiennent une certaine quantité de gaz qui, grâce à la chaleur, échappent à toute combinaison; le savant chimiste a réussi, par des procédés très-ingénieux, à isoler ces gaz de manière à mesurer leurs volumes. Il a ainsi démontré que, dans la combustion du mélange d'oxygène et d'hydrogène, une moitié du gaz est maintenue à l'état de dissociation par la grande quantité de chaleur que l'autre moitié produit en brûlant. Ces phénomènes sont comparables à celui de la condensation des vapeurs. La partie de la masse gazeuse qui se condense développe une quantité considérable de chaleur qui était latente et qui redevient sensible; cette chaleur sert à maintenir à une température suffisamment élevée la partie qui échappe à la condensation. C'est ainsi qu'une masse de vapeur d'eau, en se condensant à l'état liquide, perd une quantité de chaleur égale à 540 calories; pour se solidifier elle en perdra de nouveau 79; de sorte que la vapeur, pour passer à l'état liquide, pourra émettre 540 unités de chaleur sans que sa température s'abaisse, malgré les pertes de calorique. Il en est de même pour une masse liquide qui se solidifie. Il est évident que le re-

froidissement est singulièrement ralenti par ces propriétés.

Il y a la plus grande analogie entre les faits que nous venons de rappeler et ceux qui accompagnent les combinaisons chimiques. A l'état de dissociation, les gaz contiennent une certaine quantité de chaleur latente qui devient sensible au moment où la combinaison s'effectue. Toute la chaleur qui disparaît dans la dissociation reparaît dans la combinaison, sans perte aucune, et, d'après les dernières déterminations, cette quantité de chaleur est égale, pour l'eau, à 3830 calories. Aussi, en supposant que ces deux gaz se combinent complétement, sans qu'aucune partie reste dissociée, il en résulterait une quantité de chaleur égale à 3830 calories. Une belle expérience de physique nous donne un exemple très-remarquable de cette absorption de chaleur dans les décompositions. On plonge dans un verre d'eau deux fils de platine très-minces que l'on fait communiquer avec les pôles d'une pile puissante; si les fils plongent à une faible profondeur, l'eau s'échauffe rapidement sans se décomposer; mais si on les enfonce davantage, la décomposition commence, et la température cesse de s'élever.

Supposons qu'une masse de gaz dissocié passe à l'état de combinaison, toute la chaleur latente de dissociation deviendra sensible, et par conséquent le refroidissement sera beaucoup plus lent. Supposons que le rayonnement fasse perdre au corps une quantité de chaleur capable de le refroidir en un an de 1 degré; comme la dissociation fournit 3830 calories,

ce même refroidissement de 1 degré ne se produira qu'en 3830 ans.

On objectera sans doute que le Soleil n'étant pas uniquement composé d'oxygène et d'hydrogène, le calcul précédent n'a aucune application. Mais d'abord les observations spectrales prouvent que l'hydrogène se trouve en très-grande quantité dans le Soleil. De plus, il y a des substances pour lesquelles la dissociation demande une température tellement élevée, que nous ne saurions l'étudier. Dans tous les cas, il n'est pas nécessaire de connaître exactement la chaleur latente de dissociation de tous les corps pour comprendre le rôle important qu'elle joue dans le phénomène que nous voulons expliquer. En supposant que la masse solaire ait une chaleur de dissociation moyenne égale à celle de l'eau, il faudrait quarante siècles pour un refroidissement d'un degré. Il est donc impossible que nous parvenions à nous apercevoir de ces changements, car ils doivent être beaucoup moins considérables que ceux qui se produisent aux époques des maxima et des minima des taches, et ces derniers échappent complétement à nos évaluations.

On le voit, quoique la température du Soleil ne soit pas absolument constante, ses variations sont cependant si peu considérables, qu'il n'est possible de les constater qu'après plusieurs milliers d'années. Après un laps de temps beaucoup plus considérable, après plusieurs millions de siècles par exemple, le Soleil se sera considérablement refroidi; il viendra sans doute une époque où il n'aura plus le pouvoir

d'entretenir la vie à la surface des planètes; il est possible que l'Auteur de la nature ait disposé les choses dès le commencement de manière à réparer son activité par quelque phénomène extraordinaire, par exemple par la chute d'une nébuleuse. Mais ce sont là des questions oiseuses auxquelles nous aurions tort de nous arrêter. Qui sait si l'ordre qui règne actuellement dans notre système solaire doit y régner indéfiniment? L'état actuel n'a pas toujours duré, la géologie nous l'enseigne, et puisqu'il a dû avoir un commencement, pourquoi ne devrait-il pas avoir une fin ?

Si l'on admet les idées que nous venons d'indiquer sur l'état actuel du Soleil et sur son mode de formation, il faut en tirer les deux conclusions qui suivent : 1° en vertu de la loi des aires, les couches intérieures doivent posséder un mouvement de rotation plus rapide que les couches extérieures, et le frottement n'a peut-être pas encore établi dans toute la masse un mouvement identique ; 2° les points situés à l'équateur doivent être animés d'une vitesse plus grande que les points plus rapprochés des pôles. Nous avons vu que ce fait est accusé par le mouvement des taches. Cependant, nous devons avouer que la théorie exacte de la circulation dans la masse solaire n'est pas encore donnée, et ce que nous avons dit à ce sujet doit être regardé comme une simple hypothèse.

Il se présente cependant une objection qui peut au premier abord paraître embarrassante, mais qui n'est pas sérieuse. Le Soleil est un centre puissant d'attraction : dès lors, comment admettre qu'il se trouve à l'état gazeux? L'attraction est proportionnelle aux

masses : comment une masse gazeuse ayant un volume limité pourrait-elle produire des effets aussi considérables? Pour répondre à cette objection, remarquons que l'état gazeux n'est pas incompatible avec une densité très-considérable. En comprimant un gaz pour diminuer son volume et augmenter son poids spécifique, on finit tôt ou tard par le liquéfier; mais pour empêcher cette liquéfaction il suffit d'élever la température. Or ces deux circonstances se trouvent réunies dans le Soleil : la température y est très-élevée, et la pression, au moins dans les couches intérieures, y devient énorme. D'ailleurs, la densité moyenne du Soleil, rapportée à celle de l'eau, est seulement de 1,42; elle n'est donc pas très-considérable, surtout si nous remarquons que, dans cette masse, il y a beaucoup de métaux dont le poids atomique est très-élevé par rapport aux gaz proprement dits. La théorie thermodynamique avait déjà indiqué que l'état gazeux et l'état liquide ne sont pas séparés par une discontinuité réelle : les belles expériences d'Andrews sur l'acide carbonique ont prouvé qu'entre les deux états il y a une loi de continuité. Une portion considérable de la masse solaire pourrait bien se trouver sur la limite, vu les circonstances de température et de pression.

De tout ce que nous avons exposé dans ce Chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes qui en seront le résumé :

1° La température du Soleil s'élève à plusieurs millions de degrés, mais il nous est impossible de la déterminer avec précision.

2° Cette température est très-probablement le ré-

sultat de la gravitation; elle aurait été produite par la chute de la matière qui constituait la nébuleuse primitive, et qui compose actuellement le Soleil et les planètes.

3° A cette époque de formation, la température devait être beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est maintenant : le Soleil est donc dans une période de refroidissement.

4° Quoique le Soleil perde continuellement des quantités énormes de chaleur, l'abaissement de température est extrêmement faible; il ne dépasse pas 1 degré en quatre mille ans. Ce résultat est dû à l'état de dissociation dans lequel se trouve la matière sous l'action de la chaleur.

5° Quoique la température du Soleil ne soit pas absolument invariable, ses variations séculaires sont cependant plus faibles que les fluctuations à courte période dont nous constatons l'existence sans pouvoir les étudier d'une manière complète : aussi devons-nous penser que notre planète restera habitable pendant une longue suite de siècles.





DEUXIÈME PARTIE.

ACTIVITÉ EXTÉRIEURE DU SOLEIL.

CHAPITRE PREMIER.

LES RADIATIONS.

Jusqu'à présent, nous avons considéré le Soleil en lui-même, et nous avons cherché à déterminer sa nature, autant que les observations optiques nous ont permis de le faire. Nous allons maintenant étudier son activité extérieure, ce qui achèvera de nous faire un peu connaître la puissance incalculable de ce foyer de force et de vie. Son activité extérieure s'exerce de deux manières dans l'espace qui l'environne : par les radiations et par la gravitation. Étudions la première de ces deux formes d'action, en réservant la seconde pour un autre Chapitre.

§ I. — *Influence des radiations dans l'univers.*

Nous avons beaucoup parlé des radiations lumineuses et calorifiques, mais nous les avons envisagées seulement au point de vue des idées qu'elles pouvaient nous fournir sur la constitution du Soleil ; nous devons maintenant les examiner en détail et étudier l'influence qu'elles exercent sur les planètes.

Le Soleil est, pour ainsi dire, le premier moteur duquel dépendent tous les mouvements du système planétaire, non-seulement pour la régularité des orbites que décrivent les différents astres, mais aussi pour les phénomènes physiques ou physiologiques qui s'accomplissent à leur surface. Sur la Terre, en particulier, les mouvements atmosphériques, le mouvement des eaux, le développement de la végétation, la production de force qui résulte des combustions et de la nutrition des animaux, tous ces phénomènes sont dus à l'influence des radiations solaires.

L'atmosphère est une véritable machine, bien qu'on n'y voie ni rouages ni pistons; des masses considérables d'air et de vapeur y sont maintenues en circulation par l'action de la chaleur solaire. C'est la force du Soleil qui, en dilatant l'air dans certaines régions, le soulève en masses considérables et produit ainsi un vide que d'autres masses gazeuses viennent combler rapidement; de là ces courants atmosphériques et cette action puissante du vent qui transporte nos vaisseaux sur les mers. C'est la force émanée du Soleil qui soulève les eaux sous forme de vapeurs, et les laisse retomber ensuite en pluie bienfaisante destinée à féconder nos campagnes. C'est encore au Soleil que nous devons ces ruisseaux qui nous désaltèrent, ces fleuves dont les eaux font mouvoir nos machines; par la vapeur enlevée à l'Océan, il alimente les neiges, qui, du sommet des montagnes, distribuent le mouvement, la fécondité et la vie.

Mais, quelque chose de plus admirable encore, c'est la manière dont la force du Soleil se trouve, pour ainsi dire, emmagasinée dans les végétaux, non-seu-

lement dans ceux qui, encore vivants, servent à nos usages et à notre alimentation, en même temps qu'ils ornent et embellissent notre demeure ici-bas; mais aussi dans ceux qui, ensevelis depuis plusieurs milliers d'années dans les entrailles de la Terre, en sortent maintenant pour nous échauffer et pour produire la force motrice nécessaire à nos machines. Les rayons solaires, en tombant sur les plantes, ne sont pas réfléchis et dispersés comme il arrive lorsqu'ils tombent sur les pierres nues ou sur les sables du désert; ils y sont en grande partie retenus, et la force mécanique de leurs vibrations est employée à détruire les combinaisons que l'oxygène forme avec le carbone et l'hydrogène, combinaisons stables connues sous le nom d'eau et d'acide carbonique, deux éléments essentiels de l'air atmosphérique. Les plantes s'assimilent alors l'hydrogène et le carbone en formant des composés moins stables qui, plus tard, soit dans nos foyers, soit dans les organes respiratoires des animaux, se détruisent pour reconstituer de nouveau l'eau et l'acide carbonique, en restituant la force vive que le Soleil avait dépensée dans le travail précédent. Chaque plante est donc une véritable machine dans laquelle s'élaborent ces substances éminemment combustibles qui servent à nous fournir, en l'absence du Soleil, la chaleur et la lumière, ou bien à produire, en nous servant d'aliment, la force et la chaleur vitale dont nous avons besoin. C'est donc du Soleil en dernière analyse, que, d'une manière plus ou moins éloignée, dépendent tous les phénomènes de la nature et notre existence elle-même.

La manière dont s'accomplissent ces merveilleuses

opérations nous est encore inconnue; nous savons seulement que ces phénomènes se produisent par l'intermédiaire des vibrations lumineuses, calorifiques et chimiques; l'énergie solaire se propage jusqu'à nous sous forme de vibrations, et exécute ces œuvres étonnantes que nous savons mettre à profit. Lorsque deux molécules sont unies par les liens de l'affinité chimique, il faut une force pour détruire cette combinaison, et la force ainsi employée produit un travail que l'on peut comparer à un travail mécanique quelconque. Par exemple, pour élever un corps à une certaine hauteur, c'est-à-dire pour séparer un corps de la Terre, il faut employer une certaine force et produire un certain travail; en retombant, le corps restitue la force qui avait été employée à le soulever. Le Soleil produit quelque chose de semblable entre les molécules des corps placés à la surface de la Terre; on peut dire que sa force est emmagasinée dans les végétaux, comme celle de la Terre est emmagasinée dans une masse élevée à une grande hauteur, comme celle d'une machine dans le volant qui tourne avec elle.

Ce que le Soleil opère de nos jours, il l'a également produit pendant les siècles innombrables qui ont précédé la création de l'homme; les végétaux qui se sont développés à certaines périodes géologiques ont été, par l'action du temps, transformés en houille et en lignites, et lorsque nous brûlons maintenant ces substances dans les foyers de nos machines à vapeur, nous en faisons sortir la force qui leur a été autrefois communiquée par le Soleil.

Ces notions, que la science a rendues si populaires,

montrent quel immense pouvoir possèdent les radiations du Soleil, que nous nous proposons maintenant d'étudier en détail.

§ II. — *Distinction des radiations.*

Ce qui frappe tout d'abord, dans le rayonnement solaire, c'est la lumière qui nous éclaire et la chaleur qui l'accompagne; mais, outre ces deux ordres de phénomènes, il y en a un troisième qui est très-important, ce sont les actions chimiques qui accompagnent les deux autres. Aussi doit-on distinguer trois ordres d'actions qui émanent du Soleil, et que l'on confond ordinairement sous la dénomination unique de *lumière*. Ce sont : 1° l'action éclairante, qui ne produit que des effets physiologiques, en agissant sur l'organe de la vue; 2° l'action thermique, qui agit indistinctement sur tous les corps en les échauffant; 3° l'action chimique, qui produit certains phénomènes de désagrégation moléculaire.

Ces activités ne sont pas trois entités distinctes; ce sont des effets différents d'une même action, consistant simplement dans une série d'ondulations qui ne diffèrent entre elles que par leur longueur et la rapidité avec laquelle elles se produisent. Les ondes dont la longueur est comprise entre 768 et 369 millioniêmes de millimètre sont capables de faire vibrer notre nerf optique; elles produisent ainsi la sensation de la lumière; la diversité des couleurs ne dépend que de la longueur des ondes : les plus grandes se trouvent dans le rouge et elles vont en décroissant vers le violet.

A partir de la couleur verte, en allant vers le violet,

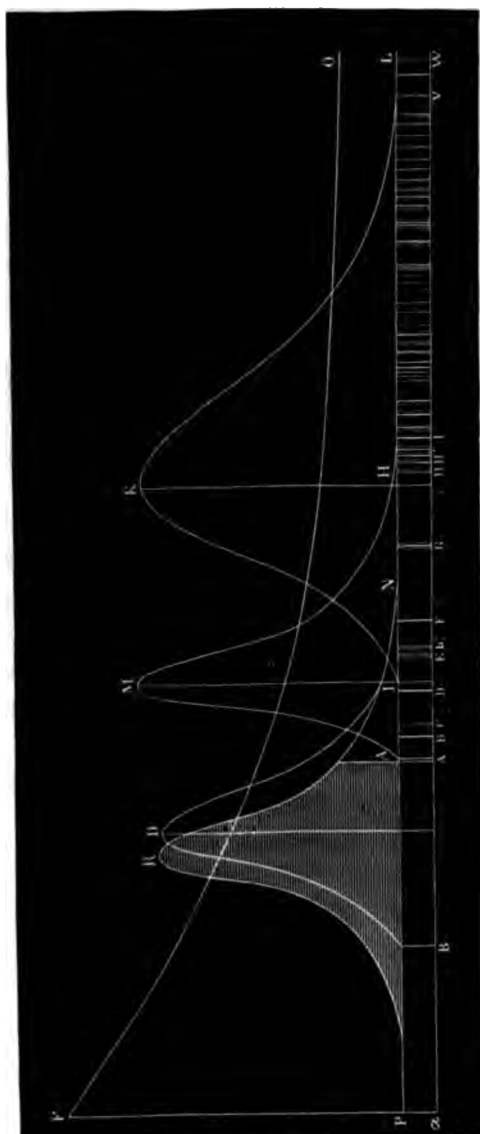
les ondes lumineuses possèdent, en outre, le pouvoir de désagréger les groupes moléculaires et de produire des actions chimiques, en même temps qu'elles excitent à la surface de certaines substances des vibrations lumineuses assez remarquables. Ces ondes s'étendent bien au delà du spectre visible, dans une région où l'œil ne peut rien apercevoir; on le reconnaît en employant des préparations photogéniques ou des substances d'une nature particulière qu'on appelle *fluorescentes*, du nom d'une substance qui présente ce phénomène, le spath fluor.

A partir du vert, en allant du côté du rouge, les ondes deviennent plus longues, et elles possèdent la propriété d'ébranler les groupes moléculaires par une action simplement physique, sans les décomposer, du moins dans les cas ordinaires; ces ondes s'étendent également au delà du rouge et forment ainsi une seconde partie invisible du spectre.

En réalité, cependant, il n'existe dans la nature qu'une seule et unique série d'ondes dont la longueur va constamment en décroissant à partir de l'extrémité du spectre calorifique obscur jusqu'à l'extrémité du spectre chimique dans sa partie invisible. Entre ces deux extrêmes, il n'y a qu'une portion très-limitée jouissant de la propriété d'ébranler notre nerf optique.

La *fig.* 101 nous montre l'étendue et l'intensité relative de ces différentes actions séparées l'une de l'autre, comme nous les présente l'action dispersive des prismes. La zone PW, qui forme la base de cette figure, nous montre, dans la partie visible, les principales raies de Fraunhofer, et, au delà du violet,

Fig. 101.



celles qui ont été révélées par l'action chimique. En deçà du rouge et dans la zone APαBA se trouve la région qui correspond à la partie obscure des rayons thermiques. Les courbes qui se trouvent au-dessus font connaître, par leurs ordonnées, les intensités relatives de chaque radiation dans les différentes parties du spectre. L'intensité de la lumière est représentée par la courbe AMH, celle de l'action chimique par IKL, celles des radiations calorifiques par BDN. La courbe PRN représente l'intensité des rayons calorifiques de l'arc voltaïque, d'après M. Tyndall.

La courbe supérieure FO représente la longueur relative des ondes appartenant à chaque région du spectre. Les ondes extrêmes du spectre ordinaire ont des longueurs qui sont dans le rapport de 1 à 4,3; si nous prenons les deux parties obscures, pour le spectre calorifique d'un côté et pour le spectre chimique de l'autre, nous trouvons que les longueurs des ondes extrêmes sont dans le rapport de 1 à 24 : cependant il y a quelque incertitude pour les ondes les moins réfrangibles. Nous donnons ici le tableau des longueurs d'onde qui correspondent aux points principaux, en y ajoutant le nombre des vibrations qui s'exécutent en une seconde :

	LONGUEUR en millionièmes de millimètre.	NOMBRE des vibrations en une seconde.
Limite extrême des rayons calorifiques (prisme en sel gemme)....	4800	63 millions.
Limite du rouge..................	1445	155 »
Raie jaune D.....................	589	509 »
Violet extrême H.................	396	758 »
Extrémité du spectre chimique.....	317	946 »
Extrémité du spectre du cadmium..	210	1364 »

Le premier nombre de vibrations a été donné par M. Miller, le dernier par M. Mascart.

Il est intéressant de comparer la longueur de ces vibrations à celles des ondes sonores. Les sons les plus graves que notre oreille puisse percevoir correspondent à 31 vibrations par seconde; les plus aigus à 36000 vibrations; peut-être une oreille exercée peut-elle arriver à percevoir les sons correspondant à 40000 vibrations; par conséquent les nombres extrêmes sont entre eux dans le rapport de 1 à 130 environ. Les limites sont donc bien plus écartées l'une de l'autre que pour les vibrations rapides connues et mesurées, et, en particulier, les vibrations sonores sont bien plus étendues que les vibrations lumineuses, puisque ces dernières embrassent à peine une octave. Si l'on adopte certains résultats du professeur P.-M. Garibaldi, de Gênes, on aurait pour limite inférieure des ondes thermiques, à la température de 73 degrés centigrades, un nombre de vibrations qui ne dépasserait pas par seconde 40000000, de sorte que la lacune qui existe entre la série acous-

tique et la série thermique serait représentée par le rapport de 1 à 1000. Il est cependant certain que les vibrations intermédiaires existent dans les solides, car, en frappant des verges très-courtes, comme l'a montré M. Kœnig, on obtient un son dont la durée est très-courte, ce qui fait qu'on peut difficilement le distinguer d'un simple bruit. Or cette même percussion produit une élévation sensible de température, et fait, par conséquent, vibrer l'éther. Mais nous manquons de moyens pour reconnaître la présence de ces ondes intermédiaires entre celles qui produisent le son et celles qui produisent la lumière.

Arrêtons-nous à ces considérations générales et étudions maintenant chaque radiation en particulier.

§ III. — *Radiation lumineuse.*

Nous nous occuperons d'abord de la radiation lumineuse, car c'est celle que nous connaissons le plus immédiatement, celle que nous pouvons le plus facilement étudier, et à laquelle ont d'abord été consacrées les différentes expressions constituant la terminologie adoptée plus tard pour les autres. Nous ne répéterons pas ici les détails que nous avons déjà donnés relativement au spectre lumineux et à l'origine des raies noires qu'on y remarque. Nous exposerons seulement ce qui a rapport à l'intensité de la lumière.

La courbe AMH (*fig.* 101) a été tracée par Fraunhofer, à l'aide d'un procédé bien imparfait; mais c'est le seul qu'on puisse employer, car il est fort difficile de comparer rigoureusement le pouvoir éclairant des rayons de différentes couleurs; nous ne pou-

vons que comparer à ce point de vue les sensations qu'un œil bien conformé éprouve sous l'action de différentes ondes lumineuses. La bonne constitution de l'œil est une condition très-essentielle, car il y a des individus affectés de la maladie connue sous le nom de *daltonisme,* pour lesquels les sensations du rouge et du vert se confondent. En réalité, on ne peut pas être certain que la même onde lumineuse fasse éprouver la même sensation à tous les individus, car une couleur n'est, après tout, qu'une dénomination purement conventionnelle, qui reste constante dans les cas semblables, circonstance qui rend impossible la découverte d'une différence, sauf le cas fort rare où un même individu donne le même nom à deux couleurs différentes.

Le pouvoir éclairant des différents rayons consiste donc, pour le physicien, dans l'aptitude plus ou moins grande qu'ils possèdent d'ébranler le nerf optique de l'homme. Il est probable que la faculté de percevoir les phénomènes lumineux n'a pas la même échelle pour tous, et qu'elle est beaucoup plus étendue chez certains animaux que chez l'homme, soit du côté du rouge, soit du côté du violet. L'eau pure possède un pouvoir absorbant très-considérable pour les rayons thermiques ; aussi, lorsqu'on emploie un prisme creux rempli d'eau, la chaleur ne commence à être sensible que dans le rouge, et elle a son maximum dans le jaune. Les humeurs que contient l'œil diffèrent peu de l'eau pure, et c'est là ce qui rend l'organe de la vue insensible aux rayons calorifiques.

L'étendue des ondes lumineuses sensibles à l'œil correspond ordinairement à ce qu'on appelle en acous-

tique une octave, de sorte que l'homme n'est mis en relation avec le monde éloigné que par une très-faible partie des radiations solaires. Et cependant, quelle immense variété de sensations et quelle beauté de contrastes ! Nous ne voulons pas entrer dans cet ordre de considérations, mais il nous est impossible de ne pas faire ici une remarque importante. On a cru pendant longtemps que la radiation lumineuse était le seul mode d'action du Soleil sur le monde. Cependant elle est très-secondaire, et son importance est bien faible si nous la comparons aux autres radiations. Que sont donc les impressions produites sur la matière délicate de notre rétine, si nous les comparons avec les modifications que la chaleur fait éprouver à tous les corps et avec les actions moléculaires que produisent les rayons chimiques ?

On a fait beaucoup de recherches dans le but de savoir s'il y avait des relations simples entre les longueurs d'onde et les sensations des couleurs principales. On admet, d'après Newton, une gamme connue de tous les physiciens, mais dans laquelle, en réalité, il y a beaucoup d'arbitraire. Après la découverte de Fraunhofer, on a cherché si la position des raies principales ne correspondait pas à des intervalles musicaux, mais on n'est parvenu à aucun résultat bien certain. Ainsi, on a trouvé que les raies C, D, H, I correspondent sensiblement aux notes musicales *ré*, *mi*, *si*, ut_2, et, de plus, la raie A serait peu éloignée de la position qui correspond à ut_1. Si l'on prend la lettre C comme correspondant au *ré*, F serait un *sol*, avec une différence de $\frac{1}{81}$, c'est-à-dire d'un *comma*. Mais tous ces rapports n'ont aucune influence rela-

tivement à la vision, car nous savons qu'il n'y a point de ressemblance entre l'harmonie musicale et ce qu'on peut appeler l'harmonie chromatique. Celle-ci existe sans doute, mais on doit l'étudier *a posteriori*, par des méthodes qui sont tout à fait en dehors de notre sujet.

La courbe des intensités lumineuses, ainsi que celle des autres radiations, n'est pas symétrique par rapport à l'ordonnée du sommet : elle monte plus rapidement qu'elle ne descend. C'est un effet dû à la réfraction du prisme. Les corps réfringents ne dévient pas les rayons lumineux proportionnellement à la longueur des ondes, mais la déviation est plus sensible pour les plus petites ; aussi la dispersion est-elle plus grande dans le violet. Dans les spectres produits par diffraction au moyen des réseaux, cette cause ne subsiste pas, et la courbe des intensités lumineuses est symétrique par rapport au maximum qui se trouve dans le jaune. Mossotti a vérifié par le calcul l'explication que nous venons de donner.

Les limites du spectre visible ne sont pas les mêmes pour tous les individus, surtout du côté du violet ; il y en a qui voient une partie considérable des rayons chimiques, qui sont obscurs pour la plupart des observateurs. Ce résultat peut tenir en partie à la phosphorescence que ces rayons développent sur la substance qui les reçoit ou dans les milieux de l'œil lui-même, milieux dont la fluorescence a été constatée.

On a cherché à comparer l'intensité de la lumière solaire avec celle des étoiles et des autres lumières connues, mais toutes ces mesures sont loin d'être précises. Bond a trouvé que le Soleil a un pouvoir éclairant représenté par 470000 si on le compare à celui

de la pleine Lune, à 622000000 si on le compare à celui de Vénus prise dans tout son éclat, à 5980000000 si on le compare à celui de Sirius. Mais nous croyons que tous ces nombres sont beaucoup trop faibles, car, pendant une éclipse totale, la petite quantité de lumière qui éclaire l'atmosphère est plus considérable que celle de la pleine Lune, et il serait bien difficile de déterminer numériquement le rapport de cette faible lumière avec celle de l'astre radieux.

La difficulté qu'on éprouve à comparer la lumière du Soleil avec une unité déterminée fait qu'il est à peu près impossible de constater si son éclat est constant. Les astronomes sont généralement d'accord pour ranger cet astre parmi les étoiles variables, mais on n'a pas encore pu constater ses variations d'une manière péremptoire. Si jamais on y réussit, ce sera, sans doute, par un moyen plus précis que la simple sensation de la vue; on aura probablement recours aux effets thermiques ou chimiques, ou à quelque autre phénomène susceptible d'une mesure exacte et précise. Nous savons maintenant que les taches présentent des variations périodiques; mais nous ne pouvons pas en conclure que le pouvoir éclairant du Soleil présente des variations analogues, car il est possible que la diminution d'éclat provenant de la présence des taches soit compensée par l'accroissement de lumière dû aux facules.

§ IV. — *Radiations thermiques.*

Nous avons déjà exposé ce qui concerne l'intensité de ces radiations; il nous reste à examiner ce qui est relatif à leur nature et à leurs propriétés.

Après avoir fait passer un faisceau de rayons solaires à travers un prisme, si on les reçoit sur un thermoscope très-délicat, ou mieux sur une pile thermo-électrique, on trouve que le maximum de chaleur correspond à une région différente, suivant la nature du prisme. Avec un prisme de verre ordinaire, il se trouve dans le rouge; il correspond au jaune lorsqu'on emploie un prisme creux rempli d'eau; le flint le renvoie un peu au delà du rouge; enfin, avec un prisme de sel gemme, ce maximum se trouve bien au delà du rouge, à une distance de la raie A égale à celle qui sépare les deux raies A et C.

Ces différences mirent les physiciens dans un grand embarras, jusqu'à l'époque des expériences de Melloni. Ce savant a montré que les différentes substances possèdent une force absorbante élective et particulière, chacune d'elles agissant sur différents rayons calorifiques, absorbant les uns et laissant passer les autres, à peu près comme les milieux colorés agissent sur la lumière blanche. Il nomma cette propriété *thermochrose*. Si l'on analysait la lumière du Soleil avec un prisme rouge, jaune ou vert, on trouverait que le maximum de pouvoir éclairant correspond à des régions différentes suivant les cas; c'est à peu près ce qui arrive pour la chaleur dans les expériences que nous venons de citer. Le sel gemme est la substance la plus diathermane que nous puissions employer pour l'analyse des rayons solaires, mais elle n'est pas complétement dépourvue de pouvoir absorbant.

Les gaz eux-mêmes possèdent la faculté d'absorber les rayons calorifiques, et, par conséquent, notre atmosphère absorbe une portion très-considérable de

ces rayons. Les ondes les plus longues sont celles qui sont plus facilement absorbées; aussi un grand nombre des rayons moins réfringents qui tombent sur notre atmosphère sont arrêtés et ne parviennent pas jusqu'à nous.

L'absorption produite par les gaz simples, oxygène et azote, est extrêmement faible; si l'on fait varier la pression de 5 à 760 millimètres, cette même absorption varie à peu près dans le rapport de 1 à 1,5. Il n'en est pas de même des gaz composés qui se trouvent dans notre atmosphère, comme l'acide carbonique, la vapeur d'eau, l'ammoniaque et quelques autres. Le professeur P.-M. Garibaldi, de Gênes, a prouvé par des expériences péremptoires que, pour une pression de 760 millimètres, ces gaz ont des pouvoirs absorbants représentés par les nombres qui suivent :

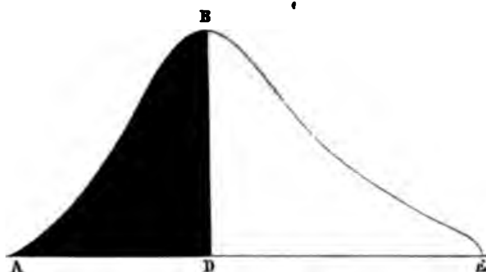
Air atmosphérique..............	1
Acide carbonique...............	92
Ammoniaque....................	546
Vapeur d'eau..................	7937

Une quantité de vapeur d'eau capable de produire une pression de 9 à 10 millimètres exerce déjà une absorption cent fois plus grande que celle de l'air atmosphérique.

Il résulte de ces propriétés qu'il nous est impossible de recevoir, et, par conséquent, d'analyser toutes les radiations calorifiques du Soleil; la courbe BDN tracée dans la *fig.* 101 ne représente que celles qui ont déjà traversé notre atmosphère en y subissant une absorption assez considérable.

Pour reconnaître les autres radiations, les physiciens ont eu recours à des sources artificielles de chaleur. M. Tyndall, en particulier, a analysé avec beaucoup de précision la source la plus active que nous connaissions, savoir : l'arc voltaïque. Pour établir plus facilement une comparaison entre les différents résultats, nous reproduisons ici trois courbes. La *fig.* 102

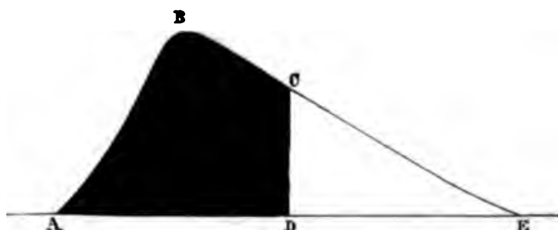
Fig. 102.



est due à W. Herschel; elle représente la variation de l'intensité calorifique dans le spectre obtenu par un prisme de flint; la partie ombrée est relative aux rayons de chaleur obscure.

La *fig.* 103 représente le spectre obtenu par M. Müller avec un prisme de sel gemme.

Fig. 103.



sible de cette lentille il se développe une température assez élevée pour déterminer l'inflammation des corps combustibles. Le professeur Garibaldi a prouvé, par des expériences semblables, que, pour le platine incandescent, le rapport des radiations lumineuses aux radiations obscures est tout au plus égal à $\frac{13}{320}$. Pour le Soleil, M. Tyndall a prouvé que la chaleur qui accompagne la partie lumineuse est seulement $\frac{1}{9}$ de celle qui se trouve dans la partie obscure.

Depuis le vert jusqu'au violet, nos thermoscopes les plus sensibles n'accusent plus aucune espèce de chaleur. Il ne faut pas en conclure que les ondulations correspondantes soient inactives : c'est là que commence une nouvelle activité, celle qui a pour effet d'ébranler les groupes atomiques et de détruire les combinaisons résultant de l'affinité.

L'atmosphère terrestre, en absorbant une portion si considérable des rayons solaires, ne les anéantit pas; elle les tient en réserve pour les employer plus tard à notre avantage. D'abord, la partie qui arrive jusqu'à nous échauffe les corps et se trouve, par leur action moléculaire, transformée en chaleur de basse température à ondes très-longues; ces rayons, ainsi transformés, ne sont plus capables de traverser l'atmosphère, ce qui produit une accumulation de chaleur dans les couches les plus basses. On peut même, en prenant certaines précautions, amener ainsi l'eau à la température de son ébullition. Il suffit, pour cela, de faire tomber les rayons solaires sur une boîte noircie, doublée de substances non conductrices et dont l'ouverture, tournée du côté du Soleil, est recouverte de plusieurs lames de verre transparent. Un thermomètre

exposé dans cette boîte indique bientôt une température supérieure à 100 degrés, car les rayons de basse température qui prennent naissance dans l'enceinte, ne pouvant traverser le verre, restent dans l'intérieur de la boîte et l'échauffent de plus en plus; et comme, d'après la loi de la radiation solaire, le thermomètre doit toujours indiquer 13 ou 14 degrés au-dessus de la température du milieu dans lequel il se trouve plongé, on arrive ainsi à une limite qui peut dépasser 100 degrés. On a même proposé d'utiliser cette chaleur pour échauffer l'eau et économiser le combustible.

La chaleur emmagasinée dans l'atmosphère nous rend encore un autre service. La radiation nocturne est considérablement diminuée par la présence de l'air atmosphérique, et par là se trouve ralenti et diminué le refroidissement du globe et des plantes qu'il nourrit. La vapeur d'eau agit avec une très-grande efficacité, et une couche humide ayant quelques mètres seulement d'épaisseur arrête le refroidissement nocturne autant que le fait l'atmosphère tout entière.

Mais la circonstance la plus importante, c'est l'absorption de calorique qui accompagne la transformation de l'eau en vapeur. L'eau s'évapore en masse considérable, surtout dans les régions équatoriales, et elle absorbe ainsi une grande quantité de chaleur de vaporisation qui demeure latente. Cette chaleur a pour destination d'être transportée vers les latitudes les plus lointaines, et d'établir, dans l'enveloppe atmosphérique qui entoure le globe, une égalité de température que la radiation directe serait loin de produire par elle-même. La quantité de chaleur qui passe ainsi

de l'équateur aux pôles est extrêmement considérable, comme on le comprendra par une évaluation grossièrement approchée.

Des observations nombreuses et assez précises nous ont appris que, dans les régions équatoriales, l'évaporation fait disparaître chaque année une couche d'eau ayant au moins 5 mètres d'épaisseur. Supposons que, dans les mêmes régions, il tombe annuellement une couche de pluie de 2 mètres; il reste encore une quantité d'eau représentée par une couche de 3 mètres et qui doit passer à l'état de vapeur dans les contrées plus rapprochées des pôles. On peut évaluer à 70 millions de milles géographiques la surface sur laquelle se produit l'évaporation, et, en partant de cette donnée, on trouve que la couche de 3 mètres représente un volume d'eau égal à 721 trillions de mètres cubes (721×10^{12}). La quantité de chaleur contenue dans cette masse de vapeur est capable de faire fondre une masse de fer dont le volume est au moins égal à 6 millions de milles cubes (1)!

Cette masse énorme de chaleur passe pour ainsi dire *incognito* de l'équateur aux pôles, transportée par l'action de la vapeur, et cette vapeur, en se transformant en eau et en glace, laisse échapper toute la chaleur qu'elle avait absorbée, contribuant ainsi à adoucir le climat de ces régions désolées. Le capitaine Maury, à qui nous devons ces belles considérations, fait remarquer qu'on n'aurait jamais obtenu un pareil résultat avec un gaz proprement dit, car,

(1) Nous employons ici le mille marin de 1852 mètres.

pour transporter par son intermédiaire la même quantité de chaleur, il aurait fallu l'échauffer jusqu'à la température des fournaises.

Il est donc impossible de ne pas voir dans l'ensemble de la Création une Sagesse infinie, qui, imposant certaines lois élémentaires à la matière, les a déterminées de telle sorte, que leurs conséquences les plus éloignées fussent en harmonie avec la conservation de la vie organique, et avec le bonheur des êtres raisonnables qui, après tant de siècles, devaient peupler la surface des planètes. C'est surtout dans ces résultats inattendus que brille la Sagesse éternelle, en nous étonnant par l'étendue de ses conceptions et par la précision avec laquelle elle parvient à ses fins.

Les observations les plus exactes nous prouvent que l'atmosphère terrestre absorbe, suivant la verticale, les $\frac{28}{100}$ de la chaleur qui tombe sur sa surface, et l'absorption totale, dans l'hémisphère illuminé, est à peu près égale aux $\frac{3}{5}$ de la chaleur incidente, de sorte qu'aux différentes hauteurs, la partie transmise est représentée comme il suit :

Hauteur.	Quantité transmise.
90°	0,72
70	0,70
50	0,64
30	0,51
10	0,16
0	0,00

Ce que nous avons dit des mouvements atmosphériques peut s'appliquer à la circulation des masses liquides qui composent l'Océan. C'est la chaleur solaire qui met en mouvement ces masses considérables et

détermine les courants intérieurs, dont le rôle est si important. Contentons-nous d'indiquer cette idée; son développement ne saurait trouver place dans les limites que nous nous sommes imposées.

§ V. — *Action chimique des rayons solaires.*

Grâce à la photographie, tout le monde connaît l'action que les rayons lumineux exercent sur les sels d'argent; ils les décomposent et les noircissent. Mais les rayons solaires produisent un très-grand nombre de phénomènes semblables, qui passent communément inaperçus ou bien ne se manisfestent qu'après une longue exposition à la lumière, comme sont la coloration ou la décoloration de certaines substances, et surtout la respiration des végétaux dont nous avons déjà parlé.

L'action chimique est, comme la chaleur, une action mécanique, et elle peut aussi être évaluée mécaniquement. Mais la détermination de son équivalent présente une difficulté particulière, car l'action du Soleil ne fait que mettre en jeu l'activité intérieure des molécules, et dans le résultat final il est impossible de faire la part des deux causes.

MM. Bunsen et Roscoe ont évalué l'action chimique en prenant comme point de départ la combinaison du chlore avec l'hydrogène. L'Américain Draper avait déjà remarqué que quand un rayon de lumière diffuse agit sur ces deux gaz pour déterminer leur combinaison, il y a affaiblissement de son intensité et de son pouvoir éclairant. C'est sur ce fait fondamental de la transformation de l'énergie lumineuse des ondes

éthérées en énergie chimique, que MM. Bunsen et Roscoe ont établi leur évaluation. Ils ont ainsi obtenu des résultats que nous allons indiquer :

1° L'intensité de la radiation chimique tombant sur notre atmosphère est assez grande pour produire en une minute la combinaison d'un mélange de chlore et d'hydrogène formant une couche de 35 mètres de hauteur.

2° Il n'arrive sur la Terre que les $\frac{2}{6}$ environ de ces radiations.

3° L'atmosphère possède une grande puissance diffusive pour les rayons chimiques ; c'est ce qui fait que, dans les régions polaires, ces radiations sont proportionnellement plus énergiques que la radiation thermique.

4° Jusqu'à 50 degrés de latitude, les rayons chimiques directs sont plus intenses que les rayons diffus, mais au delà c'est le contraire qui a lieu. A Saint-Pétersbourg, à Rome et à l'équateur, les rayons directs sont entre eux comme les nombres 1, 2, 4.

5° Toute l'énergie chimique qui émane du Soleil serait suffisante pour combiner en une minute 25 millions de milles cubes du mélange de chlore et d'hydrogène. Si l'on connaissait l'équivalent thermique de cette action, on pourrait l'évaluer en force mécanique, mais il est impossible de le faire actuellement à cause des difficultés que nous avons déjà indiquées. Telles sont les conclusions intéressantes du travail de MM. Bunsen et Roscoe.

L'action des rayons chimiques ne produit pas seulement des combinaisons et des décompositions. D'abord, il n'est pas impossible que ces rayons, en

pénétrant dans l'intérieur des corps, se transforment en ondes plus longues, de manière à produire un échauffement. Certains corps, qu'on désigne sous le nom de corps fluorescents, produisent un semblable effet à leur surface : par exemple, la dissolution de sulfate de quinine, l'infusion d'écorces de marronnier d'Inde, le verre d'urane, la dissolution alcoolique de chlorophylle, etc. Ces substances envoient par réflexion des rayons correspondant à des ondes plus longues que celles des rayons incidents ; de plus, bien qu'éclairées par de la lumière monochromatique, elles réfléchissent de la lumière composée.

Les rayons chimiques ont la propriété d'exciter la phosphorescence dans les corps qui en sont susceptibles, par exemple dans le célèbre phosphore de Canton. Alors aussi leur réfrangibilité est modifiée, comme on peut le voir dans le grand travail de M. Becquerel sur la lumière, car les corps phosphorescents donnent des spectres très-différents les uns des autres.

L'action moléculaire, qui augmente la longueur des ondes les plus courtes, peut aussi diminuer celle des ondes les plus longues. On en trouve un exemple frappant dans une expérience curieuse imaginée par M. Tyndall. Les rayons solaires tombent sur un vase contenant une dissolution d'iode dans du sulfure de carbone ; les rayons obscurs sont seuls à la traverser, et ils subissent ensuite l'action d'une lentille convergente ; le foyer demeure invisible, mais si l'on y place une lame de platine, elle ne tarde pas à devenir incandescente, les rayons obscurs étant devenus lumineux.

Le Soleil n'est pas le seul corps éclairant qui envoie

en même temps des rayons chimiques. Certaines sources artificielles, comme la lumière électrique et celle du magnésium, sont même plus riches que lui, toute proportion gardée. Mais il est bien probable que, sans l'action absorbante de notre atmosphère, le Soleil l'emporterait sous ce rapport comme sous le rapport du pouvoir éclairant. Cependant il règne encore beaucoup d'incertitude sur toutes ces questions. Il y aurait lieu de faire des expériences sur un plateau très-élevé, celui de Quito par exemple, afin de reconnaître avec plus de précision l'influence de notre atmosphère : dans des régions aussi peu élevées que les nôtres au-dessus du niveau de la mer, il ne nous est possible de l'évaluer que d'une manière indirecte et très-imparfaite.

§ VI. — *Activité magnétique du Soleil.*

Le titre de ce paragraphe surpendra sans doute plus d'un lecteur, car il semble impossible que la puissance magnétique réside dans un corps dont la température est aussi élevée. Mais avant tout, qu'on le remarque bien d'abord, nous ne prétendons pas qu'il existe dans le Soleil une action magnétique directe, comme celle que nous observons sur la Terre ; nous disons seulement, et c'est un fait incontestable, que le Soleil exerce une action sur les phénomènes magnétiques qui se manifestent sur notre globe. Que cette action soit directe on indirecte, c'est une question purement spéculative ; pour le moment, nous nous contenterons d'exposer les faits. Nous ajouterons seulement que, comme le globe terrestre ne doit pas

toute sa force magnétique aux minerais d'aimant, mais à un autre principe encore peu connu, il en peut être de même du Soleil. Il n'y a là rien qui doive nous surprendre, car nous savons que tout corps entouré de courants électriques peut agir comme un aimant.

Les Anglais ont particulièrement contribué pendant les dernières années, à mettre en évidence les lois qui régissent les mystérieux phénomènes du magnétisme terrestre. Ils ont érigé de nombreux observatoires magnétiques dans les deux hémisphères, et les travaux qu'ils ont exécutés ont conduit aux conclusions suivantes :

1° Lorsqu'un barreau aimanté est librement suspendu, sa position par rapport à la Terre n'est pas absolument fixe; elle varie continuellement, et ces variations présentent une période diurne et une période annuelle. Considérons, dans la boussole de déclinaison, l'extrémité qui est dirigée vers le Soleil, c'est-à-dire le pôle sud dans notre hémisphère, et le pôle nord dans l'autre. Cette extrémité semble fuir le Soleil à partir du moment où il se lève, et le mouvement cesse une heure et demie après que cet astre a passé par le méridien magnétique ; à partir de cet instant, l'aiguille revient en arrière jusqu'au coucher du Soleil. Pendant la nuit ce mouvement se répète, mais son amplitude est beaucoup moins grande.

2° On reconnaît encore dans le mouvement de l'aiguille aimantée une période annuelle. L'oscillation diurne de la boussole de déclinaison résulte de deux éléments, l'un constant, l'autre dépendant de la déclinaison du Soleil. Ces deux mouvements s'ajoutent ou

se retranchent suivant que le Soleil est dans le même hémisphère que l'aiguille ou dans l'hémisphère opposé.

3° La force horizontale, que l'on mesure à l'aide d'un barreau disposé perpendiculairement au méridien magnétique, est sujette à des oscillations pareilles, mais les maxima et les minima se trouvent à trois heures de distance de ceux de la déclinaison.

4° Il y a un maximum et un minimum annuels, indépendants de l'hémisphère où se trouve le Soleil, mais dépendant de sa position, apogée ou périgée.

5° Outre les variations régulières et normales, les barreaux aimantés sont sujets à des variations extraordinaires qui dépendent des aurores boréales et des bourrasques électriques de notre atmosphère.

6° Enfin l'amplitude de l'oscillation diurne est très-variable, et, dans une période de dix ans environ, elle peut prendre des valeurs doubles l'une de l'autre. Mais la circonstance la plus extraordinaire, c'est que les maxima et les minima coïncident avec les aurores boréales, et avec les maxima et les minima des taches visibles sur le Soleil. La même variation dans les oscillations périodiques se retrouve encore à l'époque des perturbations extraordinaires auxquelles on donne le nom d'*orages magnétiques*.

Comme cette dernière relation est très-importante, nous devons la mettre en évidence, en rapportant un extrait du tableau comparatif de ces phénomènes. Nous le tirons des travaux de MM. Wolf et Fritz, déjà mentionnés ailleurs.

MAXIMA DES TACHES.	MAXIMA des aurores boréales.	OSCILLATION DIURNE de la boussole. (Moyenne.)
1706	1707	"
1718	1721	"
1728	1728	"
1739	1738	"
1750	1749	"
1761	1760	"
1770	1769	"
1779	1779	"
1788	1788	"
1804	1804	"
1817	1816	"
1830	1830	13,07 Paris.
1837	1839	11,47 Munich.
1848	1848	11,55
1860	1859	11,17

MINIMA DES TACHES.	MINIMA des aurores boréales.	VARIATIONS DIURNES de la boussole.
1698	1700	"
1712	1714	"
1723	1724	"
1733	1733	"
1745	1745	"
1758	1755	"
1766	1766	"
1776	1776	"
1785	1785	"
1799	1799	"
1811	1811	"
1823	1823	8,18 Gœttingue.
1834	1834	7,79 Munich.
1844	1844	5,24
1856	1856	5,02
1867	1867	5,05

Malheureusement les observations magnétiques

nous font défaut pour la première partie de ce tableau; mais les dernièresp ériodes suffisent pour nous empêcher de craindre une déception.

En discutant plus sérieusement ces résultats, il paraît qu'on aperçoit la trace d'une seconde période semi-séculaire de cinquante-cinq ans et demi; mais comme elle n'est pas certaine, faute d'observations anciennes, nous nous contenterons de l'indiquer sans en dire davantage.

L'existence de la période décennale a été confirmée par des observations faites au Collége Romain pendant les dix dernières années. Nous avions, précisément dans ce but, érigé un observatoire magnétique, et, à partir de 1858, nous faisions un dénombrement exact de toutes les taches solaires.

Les astronomes admettent donc unanimement le fait d'une période décennale dans les variations du magnétisme terrestre coïncidant avec une période semblable dans la variation des taches solaires.

Quelque inattendue que soit cette conclusion, elle n'en est pas moins certaine; malheureusement cette relation est plus difficile à expliquer qu'à constater. L'influence du Soleil sur l'aiguille aimantée peut être directe ou indirecte; elle est directe si, par une action magnétique qui lui est propre ou par des courants électriques dont il est le siége, le Soleil exerce par lui-même une action sur la boussole ou sur l'aimant terrestre; elle est indirecte s'il produit dans l'état du globe des changements physiques capables de modifier le magnétisme terrestre ou les courants telluriques.

La première opinion a été soutenue par M. Sabine,

et nous l'avons autrefois partagée. Il est sans doute difficile d'admettre que la matière qui compose le Soleil jouisse d'un véritable pouvoir magnétique; mais il peut fort bien se faire que cet astre soit environné de courants électriques puissants qui agissent à distance comme de véritables aimants. Le Soleil ne serait pas le seul corps céleste présentant une action semblable, car la Lune exerce une influence, faible il est vrai, mais incontestable, sur l'aiguille aimantée.

Cependant la seconde opinion nous paraît plus probable. Nous voyons en effet que la période décennale des variations diurnes a une relation certaine avec les aurores boréales, et la valeur absolue des variations dépend d'une manière incontestable du nombre des aurores. Les aurores polaires sont certainement des phénomènes météorologiques produits par l'électricité qui est transportée de l'équateur aux pôles à travers les régions supérieures de l'atmosphère. Cette électricité produit sur le globe terrestre de véritables courants qui agissent sur l'aiguille aimantée. L'existence de ces courants telluriques est aujourd'hui parfaitement prouvée; ils produisent, dans les fils télégraphiques, des courants dérivés, capables quelquefois de donner des étincelles. Pendant quatre ans que nous avons eu à notre disposition un fil télégraphique de 50 kilomètres, nous avons trouvé que ces courants existent *toujours* et que, pendant les perturbations, ils ont une grande intensité. Dernièrement, M. Airy a tiré, des observations de Greenwich, la conclusion que tous les mouvements magnétiques sont dus à des courants circulant dans la Terre.

L'électricité étant la cause immédiate de toutes ces

perturbations extraordinaires, on pourrait rattacher à la même cause les variations périodiques de chaque jour; il est bien facile de comprendre qu'il existe chaque jour, dans l'atmosphère, une variation périodique capable de produire ce résultat. Cette variation se relie principalement aux différentes phases que présente l'état de la vapeur d'eau. On avait essayé d'expliquer cette variation uniquement par la marche du thermomètre ; mais l'influence de la température suffirait tout au plus à rendre compte des oscillations de la déclinaison, les seules que l'on connût alors; maintenant qu'on connaît les variations de l'inclinaison et de la force horizontale, il faut avoir recours à un autre mode d'explication. Le seul possible, selon nous, consiste à admettre que les variations de la température n'agissent que d'une manière indirecte sur le magnétisme, en modifiant l'état électrique du globe par l'intermédiaire des vapeurs.

Quoique cette théorie paraisse la plus séduisante, et que nous la regardions comme la plus probable, elle ne laisse cependant pas que de présenter quelques difficultés. Dans l'état actüel de la science, on ne saurait trouver avec certitude le lien qui relie ces variations électriques avec celles des taches. Sans doute la formation d'une tache doit être accompagnée de phénomènes électriques. Mais nous ne saurions imaginer comment ces phénomènes peuvent réagir sur nos aiguilles aimantées. Quant aux aurores boréales que l'on voit quelquefois apparaître simultanément dans les deux hémisphères, elles ne coïncident presque jamais d'une manière rigoureuse avec l'apparition individuelle des taches, et si cette coïncidence se présente

quelquefois, on ne doit pas y attacher beaucoup d'importance, car nous ne pouvons pas constater le moment où se forment les taches qui prennent naissance dans l'hémisphère du Soleil opposé à celui que nous voyons. On ne peut donc pas établir entre ces deux ordres de phénomènes une relation de cause à effet.

Dans le siècle dernier, Mairan chercha à rattacher les aurores boréales à l'atmosphère solaire. Mais sa théorie suppose que l'atmosphère du Soleil s'étend jusqu'à la Terre, hypothèse insoutenable.

Tout ce qu'on peut dire actuellement, c'est que la périodicité des taches suppose une périodicité dans l'activité solaire ; de même que les régions polaires du Soleil ne présentent jamais de taches, peut-être parce qu'en ces points l'activité est moins grande, de même le corps solaire tout entier, aux époques de minimum, serait dans un état de tranquillité et de repos général. Les variations de cette activité pourraient bien se communiquer à la Terre, soit par le moyen de la chaleur, soit par quelque autre moyen encore inconnu, par exemple par l'induction électrodynamique, produisant ainsi sur notre globe des phénomènes météorologiques ou électriques.

Tout ce que nous venons de dire n'est, bien entendu, qu'une simple conjecture, car cette question est une de celles dont nous devons léguer la solution aux générations qui viendront après nous. Pour la résoudre, il faudra trouver un moyen plus parfait de mesurer exactement la radiation solaire ; de plus, il faudra mesurer ces radiations pendant de longues périodes, afin de constater leurs variations et les limites entre lesquelles elles sont comprises ; ces mesures devront se faire en

différents endroits des deux hémisphères terrestres, afin d'éviter les influences locales. C'est seulement après avoir rempli ce programme, qu'on pourra se former une opinion et admettre une théorie avec connaissance de cause. Le lecteur peut juger combien nous en sommes encore éloignés.

CHAPITRE II.

LE SOLEIL CENTRE DE FORCE. — GRAVITATION.

Le Soleil est le centre autour duquel toutes les planètes décrivent leurs orbites. Il doit cette prérogative à sa masse considérable, masse qui est environ mille fois plus grande que celle de tous les astres qui lui servent de cortége. Nous exposerons ici les phénomènes planétaires qui sont intimement liés à la constitution du Soleil, sans cependant entrer dans les détails propres à un Traité de Cosmographie ou d'Astronomie. Pour ces détails, on peut consulter une foule d'Ouvrages spéciaux, parmi lesquels on nous permettra d'indiquer notre *Tableau physique du système solaire;* Rome, 1859.

§ I. — *Formation du système planétaire.*

Les savants sont de nos jours unanimes à admettre que notre système solaire est dû à la condensation d'une nébuleuse qui s'étendait autrefois au delà des limites occupées actuellement par les planètes les plus lointaines. Cette nébuleuse était primitivement douée d'un mouvement de rotation très-lent, qui devait s'accélérer plus tard. D'après une loi mécanique connue sous le nom de *loi des aires*, chaque particule libre doit se mouvoir de manière que son rayon vecteur

décrive des aires égales dans des temps égaux; de là il suit que, le rayon diminuant constamment par la contraction progressive, l'arc décrit pendant l'unité de temps a dû s'accroître, afin que l'aire restât constante. De cet accroissement de vitesse il résulte une augmentation de la force centrifuge, et lorsque celle-ci est devenue égale à la force de gravitation, il s'est formé des anneaux qui sont demeurés librement suspendus autour de la masse centrale. La vitesse augmentant toujours, ces anneaux se sont brisés, et les différents fragments, obéissant individuellement aux lois de l'attraction, ont à leur tour formé de nouvelles masses isolées les unes des autres, et qui sont devenues des centres d'action semblables au centre principal. Ces masses, à leur tour, ont pu s'environner d'anneaux de second ordre, dont quelques-uns ont persisté jusqu'à nos jours, tandis que les autres, en se brisant, ont formé des satellites.

Cette théorie, proposée par Kant, Herschel et Laplace, a été confirmée par les ingénieuses expériences de M. Plateau. Une masse d'huile étant mise en suspension dans un liquide de même densité, formé d'un mélange d'eau et d'alcool, on la voit prendre spontanément la forme sphérique que tend à lui donner l'attraction moléculaire. Si on la fait tourner autour de son diamètre vertical avec une vitesse croissante, on voit d'abord la sphère s'aplatir; puis il vient un moment où il se détache un anneau semblable à celui de Saturne; enfin, la vitesse croissant toujours, un moment vient où l'anneau se brise, et il se forme de petites sphères qui tournent sur elles-mêmes en tournant autour de la masse principale.

La matière qui composait la nébuleuse primitive devait être à un état de raréfaction beaucoup plus considérable que celui que nous obtenons avec les meilleures machines pneumatiques; elle s'est énormément contractée et condensée, laissant à différentes distances des planètes et des satellites; le Soleil est le résidu encore incandescent et gazéiforme de cette masse primitive. Nous retrouvons dans le monde sidéral des vestiges de cette formation; dans notre monde planétaire, ce sont les anneaux qui environnent Saturne, et dans le monde stellaire, ce sont les nébuleuses spirales et les nébuleuses annulaires. Ces masses sont composées d'une matière encore gazeuse, et elles semblent constituer des mondes en voie de formation.

Il est impossible d'assigner actuellement les circonstances qui ont déterminé la formation de chaque planète; mais la loi qui règle leurs distances semble imprimer au système tout entier l'empreinte d'une formation graduelle, dans laquelle ces astres ont dû, chacun à leur tour, se détacher de la masse centrale.

Kepler est le premier qui découvrit une certaine régularité dans la distribution des planètes; il y avait cependant une anomalie dans la distance qui sépare Mars et Jupiter; aussi, en s'appuyant sur cette seule remarque, osa-t-il annoncer qu'on découvrirait plus tard dans cette région un astre jusque-là inconnu. Il a fallu près de deux siècles pour que l'événement vînt lui donner raison; nous savons maintenant qu'au lieu d'une seule planète que Kepler avait en vue, il en existe une centaine. La 108e a été découverte le 29 avril 1869. Tous ces astres, cependant, tiennent

simplement la place d'une seule planète, dont la masse, d'après les calculs de M. Le Verrier, est tout au plus égale au tiers de celle de la Terre. Cet état de division nous montre qu'à l'époque où se sont formées les petites planètes, il a dû exister une grande perturbation dans la masse solaire.

Après Kepler, Titius trouva une loi plus exacte pour exprimer les relations qui existent entre les distances des planètes au Soleil. Si nous appelons n le numéro d'ordre de la planète considérée, à partir de Vénus, la loi de Titius est contenue dans la formule suivante : $D = 4 + 3 \times 2^{n-1}$. Nous reproduisons ici un tableau comparatif des distances vraies, déduites de l'observation, et des distances approchées, calculées d'après la formule précédente; le lecteur pourra apprécier l'accord remarquable qui existe entre les deux séries de nombres.

PLANÈTES.	DISTANCES VRAIES.	DISTANCES APPROCHÉES, d'après la loi de Titius.
Mercure	3,871	4
Vénus	7,233	7
La Terre	10,000	10
Mars	15,237	15
Petites planètes	22,0 — 31,6	28
Jupiter	52,028	52
Saturne	95,388	95
Uranus	191,826	196
Neptune	300,369	338

M. Hinrichs, en combinant les lois de Kepler avec l'hypothèse de la rotation primitive, a prouvé que la formule de Titius est la conséquence de la conden-

sation progressive de la nébuleuse solaire, condensation qui a dû être régulière et proportionnelle au temps, de sorte que les nombres qui mesurent les distances des planètes mesureraient aussi le temps qui a séparé leur formation. Les différences, assez petites, du reste, que l'on trouve entre les nombres calculés d'après la théorie et ceux qu'on déduit de l'observation, peuvent facilement s'expliquer par la résistance de l'éther et par les influences perturbatrices que les planètes ont dû exercer les unes sur les autres après leur formation. La résistance de l'éther doit avoir été plus sensible sur les planètes les plus anciennes : c'est pour elles, en effet, qu'on observe les plus grandes différences. Les distances des satellites, dans les systèmes secondaires, sont également sujettes à une loi semblable; mais ici encore les écarts sont plus considérables pour les planètes les plus anciennes.

M. Hinrichs arrive à une conclusion fort importante . c'est que la loi de la condensation progressive se trouve reliée à la troisième loi de Kepler. La troisième loi de Kepler est elle-même une conséquence de la gravitation universelle agissant en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances. Ce grand principe dû au génie de Newton est en réalité un résumé des trois lois de Kepler dont nous rappelons ici l'énoncé : 1° les aires décrites par les rayons vecteurs sont proportionnelles au temps; 2° les orbites sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers; 3° les carrés des durées de révolutions sont entre eux comme les cubes des grands axes. On le voit donc, la loi de la formation du sys-

tème planétaire serait une simple conséquence de la gravitation universelle.

Il est utile d'examiner avec quelques détails les circonstances principales de cette grande formation. Nous avons déjà dit que l'existence des petites planètes semble correspondre à une période de perturbation. Cette hypothèse semble confirmée par un certain nombre de faits qu'elle servirait à expliquer :

1° Toutes les planètes extérieures à cette zone ont une densité très-faible, généralement inférieure à celle de l'eau; les autres, au contraire, ont un poids spécifique cinq fois plus grand que celui de l'eau.

2° L'espace occupé par les petites planètes est plus grand que celui qui sépare la Terre du Soleil; quelques-unes d'entre elles se rapprochent tellement de l'orbite de Mars, que cette planète semble, pour ainsi dire, faire suite à la série des astéroïdes, de sorte que sa formation aurait été influencée par cette grande cause de discontinuité.

3° Toutes les planètes extérieures ont un nombreux cortége de satellites : Jupiter en a quatre, Saturne huit, Uranus quatre, Neptune en possède au moins un; parmi les planètes les plus rapprochées du Soleil, la Terre est seule à posséder un satellite.

4° Les masses des planètes extérieures sont incomparablement plus grandes; la plus petite est à elle seule plus considérable que toutes les planètes intérieures réunies. Ce fait est dû, au moins en partie, à l'immense étendue dans laquelle était primitivement répartie la masse qui compose ces planètes.

5° On a découvert un fait très-important en étudiant au spectroscope la lumière réfléchie par leurs

atmosphères. Les planètes extérieures montrent toutes pour la lumière solaire une puissance considérable d'absorption élective. Jupiter présente dans le rouge une bande noire que nous ne retrouvons pas dans nos raies atmosphériques. Saturne possède la même bande, mais encore plus foncée. Le spectre d'Uranus a deux raies spéciales très-fortes dans le vert et le bleu, et le jaune y fait complétement défaut. Le spectre de Neptune est encore plus singulier. Il présente trois bandes noires principales, la première entre le jaune et le vert, à égale distance des raies D et *b* du Soleil; la seconde coïncide avec la raie *b*; la troisième est située dans le bleu. Le jaune est assez brillant, mais le rouge fait complétement défaut; le vert est assez abondant, ce qui explique la couleur verte que présente cette planète.

Ces planètes sont donc environnées d'atmosphères très-denses et très-étendues. L'existence de ces atmosphères se manifeste encore par des bandes dont elles sont sillonnées parallèlement à l'équateur. Jupiter présente dans son aspect des variations très-grandes et des phénomènes qui semblent avoir beaucoup d'analogie avec nos nuages et nos ouragans. Au contraire, les planètes intérieures ont des atmosphères comparativement minces et transparentes, ce qui permet de distinguer le relief que présente leur surface; les variations qu'elles présentent sont sans doute dues à des nuages, mais on n'y reconnaît que des substances analogues, par leur pouvoir absorbant, à celles de notre globe terrestre. Ce n'est donc pas aller beaucoup au delà de ce que les faits semblent indiquer que de supposer les planètes extérieures à un état assez voisin de l'état nébuleux.

6° Les planètes extérieures ont une vitesse de rotation qui est, en moyenne, deux fois et demie plus considérable que celle des planètes intérieures : une différence aussi grande, et qui ne présente aucune transition, ne saurait être l'œuvre du hasard.

M. Kirkwood a cherché une loi empirique qui reliât ensemble la masse des planètes, la durée de leur rotation et celle de leur révolution, et il est arrivé au résultat suivant : Considérons une planète quelconque ; supposons-la en conjonction avec la planète intérieure la plus voisine ; déterminons par le calcul le point où ces deux astres exercent des attractions égales, et appelons r la distance de ce point à la planète considérée. Faisons le même calcul relativement à la planète extérieure, et appelons r' la distance du nouveau point d'égale attraction. Posons $r + r' = D$. Il y aura ainsi, pour les différentes planètes, des quantités D, D′, D″, etc., précises et déterminées. Appelons n le nombre de révolutions sidérales que la planète considérée accomplit autour de son axe, pendant qu'elle exécute une révolution sidérale autour du Soleil. On trouve, d'après Kirkwood, $n^2 : n'^2 :: D^3 : D'^3$, ou bien : $n = n'\left(\frac{D}{D'}\right)^{\frac{3}{2}}$, relation semblable à celle de la troisième loi de Kepler, qui relie les distances aux durées des révolutions. Cette relation suppose qu'il existe une planète unique entre Mars et Jupiter, en lui attribuant une masse à peu près égale à celle qui résulte des calculs de M. Le Verrier. L'astronome américain S. Ch. Walker a fait voir que cette relation est une conséquence de l'hypothèse nébulaire. Elle dépend de tant d'éléments peu certains qu'on ne saurait, jusqu'à

présent, la regarder comme une loi de la nature; elle constitue cependant un fait remarquable qui montre de plus en plus que toutes les masses qui composent le système solaire ont une origine commune.

Cette communauté d'origine est du reste constatée par un grand nombre de faits; contentons nous de citer les plus saillants :

7° A. Dans toutes les planètes, et dans tous les satellites, le mouvement de translation et le mouvement de rotation ont lieu dans le même sens, qui est aussi celui de la rotation du Soleil. Cette direction ne peut être que celle du mouvement de la nébuleuse primitive.

B. Les planètes décrivent des orbites très-peu inclinées les unes sur les autres, si bien qu'on peut dire qu'elles sont presque comprises dans un même plan. Les seules exceptions se trouvent parmi les petites planètes entre Mars et Jupiter : c'est-à-dire dans la région précise de la grande perturbation.

C. Les orbites des principales planètes sont très-peu allongées. Quelques astéroïdes font exception à cette loi, mais leur masse est si petite qu'on peut n'en pas tenir compte.

D. La masse centrale est prépondérante, et dépasse de beaucoup celles de tous les satellites. Ces différentes circonstances ne sont pas accidentelles, car c'est d'elles que dépend la stabilité du système tout entier.

E. Les orbites sont très-peu inclinées sur ce plan fondamental du système solaire découvert par Laplace, et qu'on appelle le *plan invariable*, parce qu'il reste constamment le même malgré les perturbations

qui résultent des actions réciproques. Ce plan ne peut être que celui de la rotation primitive de la nébuleuse solaire.

Cette hypothèse nous explique donc une foule de circonstances qui sont intimement liées ensemble, et qu'on ne saurait expliquer autrement. La théorie de Newton relie entre eux les phénomènes principaux du système solaire, et les réduit au seul principe de la gravitation; de même l'hypothèse nébulaire nous explique l'impulsion tangentielle et les circonstances physiques de second ordre que nous apercevons dans l'ensemble du système.

Pour mieux connaître le mécanisme du monde planétaire, nous devrions savoir quelles sont l'origine et la nature intime de cette force qui pousse les corps les uns vers les autres, et qu'on nomme attraction ou *gravitation*, parce que la chute des corps *graves* à la surface de la Terre n'est qu'un cas particulier de cette force; mais nous ne pouvons rien dire de certain sur ce sujet. Les mathématiciens et les astronomes admettent cette gravitation comme un fait primitif capable d'expliquer les mouvements des corps célestes, et ils lui appliquent les formules de la Mécanique sans se préoccuper de son origine. Les physiciens s'en tiennent également là, et ils ne pensent pas que l'état de nos connaissances nous permette d'aller plus loin.

Cependant, l'opinion la plus probable, celle qui tend à se répandre chaque jour davantage, attribue les phénomènes d'attraction à l'éther, ce fluide universel qui remplit le monde entier, et concourt avec la matière pondérable à la constitution de tous les corps. Mais en quoi consiste l'action de l'éther? On

est loin d'être d'accord sur cette question. Ce qui est certain, c'est qu'il doit y avoir, entre le Soleil et les planètes, un moyen de communication de force et de transmission de mouvement ; et comme l'existence du milieu éthéré est parfaitement prouvée par les phénomènes lumineux, on ne voit pas qu'il soit nécessaire d'imaginer un autre intermédiaire pour la transmission des mouvements.

D'un autre côté, les expériences relatives à l'électricité nous montrent que tous les changements de densité dans ce fluide rendent les corps qui le contiennent capables d'exercer des attractions ; on serait donc porté à croire que la gravitation elle-même pourrait bien être due à une pareille différence de densité dans le milieu éthéré qui environne le Soleil ou toute autre masse pondérable. Nous ne faisons qu'indiquer ici ces conjectures que nous avons exposées ailleurs (1). Du reste, l'action de ce milieu se présentera bientôt à nous comme produisant des phénomènes d'un autre ordre que l'attraction. Aussi devons-nous le regarder comme l'un des agents les plus importants de la création.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les corps qui composent le cortége du Soleil.

§ II. — *Les planètes.*

Le volume relatif des planètes et du Soleil est assez bien indiqué dans la *fig.* 105.

---

(1) Voir l'*Unité des forces physiques*, Paris, 1869, chez Savy.

La bande noire sur laquelle on a fait le dessin
présente le diamètre du Soleil, de sorte que pou

Fig. 105.



présenter la grandeur proportionnelle de cet a

il faudrait tracer un cercle ayant pour diamètre les deux bandes mises bout à bout. Les planètes sont figurées à l'intérieur par des cercles proportionnels à leur vraie grandeur.

Nous avons déjà parlé des relations qui existent entre leurs distances; nous nous contenterons d'indiquer ici, pour chacune d'elles, les détails les plus importants de leur constitution physique, en ce qui peut nous éclairer sur leur mode de formation.

MERCURE. — Cette planète est la plus voisine du Soleil, et la plus petite de celles qui sont anciennement connues. C'est elle qui a la plus grande densité, (6,84, en prenant celle de l'eau pour unité). Elle présente des taches très-sensibles, surtout auprès du bord intérieur du croissant où la lumière est plus faible, ce qui prouve qu'elle est environnée d'une atmosphère, et même cette atmosphère paraît plus dense que celle des planètes voisines. On y trouve des variations assez considérables dues sans doute à des nuages. Cette planète est difficile à observer.

La durée de la rotation de Mercure est de $24^h\ 5^m\ 28^s$. L'intensité de la radiation solaire y est 6,69 fois plus forte que sur la Terre, mais l'excentricité de son orbite doit produire à sa surface de grandes variations de température. Comme il est presque toujours plongé dans les rayons du Soleil on n'a pu l'examiner au spectroscope que près de l'horizon, position très-défavorable, et l'on n'a rien constaté de particulier dans son atmosphère. La durée de sa révolution est presque égale à 88^j (87,97). Sa masse est 0,05, celle de la Terre étant prise pour unité.

VÉNUS. — Cette planète se trouve dans des con-

ditions plus analogues à celles de la Terre; son volume est presque le même; sa masse est 0,87; sa densité 5,10; l'intensité de la radiation solaire y est double de celle qu'éprouve la Terre. Mais en revanche, l'axe de rotation étant, d'après le P. de Vico, incliné de 53° 12' sur le plan de l'orbite, l'arc diurne doit y être très-variable, et par conséquent les climats doivent présenter des extrêmes bien plus tranchés que chez nous. L'année de Vénus est de $224^{j},7$, et le temps de sa rotation de $24^{h}\,21^{m}\,21^{s},9$. L'atmosphère de cette planète est assez grande pour produire un crépuscule très-sensible; nous avons même pu constater que la partie éclairée par ce crépuscule correspond à un arc de 18 degrés; voici dans quelles conditions nous avons pu faire cette remarque. La planète se trouvait en conjonction inférieure, et par suite son croissant était réduit à un filet très-mince. Malgré la finesse des pointes, nous avons pu reconnaître que ce croissant embrassait plus d'une demi-circonférence, et que, de part et d'autre, il dépassait de 18 degrés l'étendue qu'il aurait dû présenter sans le phénomène du crépuscule. Quelquefois même on a cru voir le disque éclairé dans toute son étendue, et l'on a aperçu d'autres lueurs qui pourraient bien être produites par des aurores boréales.

Le spectroscope nous apprend que l'atmosphère de Vénus a une composition analogue à celle de la Terre; elle contient en particulier de la vapeur d'eau produisant des nuages, et, en effet, outre les taches fixes, on en voit encore d'autres qui sont assez variables.

La Terre. — Disons ici quelques mots de la Terre

considérée comme corps céleste. Sa densité est égale à 5,5. Son rayon équatorial est de $6377^{km},398$. Vue du Soleil, elle sous-tend un angle de 17″,8; son diamètre apparent est donc, à cette distance, égal à celui que nous offre Vénus à sa distance moyenne. Pour un spectateur placé en dehors d'elle, elle présenterait des taches constantes et des zones variables, les premières dues aux mers et aux continents, les secondes dues aux nuages. Il y aurait deux zones sombres situées de part et d'autre de l'équateur, formées par les régions sereines et transparentes des vents alizés; au delà se trouveraient des zones brillantes, plus ou moins interrompues, correspondant aux régions de pluie des tropiques. Dans le voisinage des pôles, l'aspect serait très-variable suivant les saisons.

Les phénomènes géologiques et volcaniques nous prouvent que l'intérieur de la Terre est à une température très-élevée, reste de sa chaleur primitive. Cette température est telle que, d'après les appréciations les plus modérées, à une profondeur de quelques centaines de kilomètres, toutes les substances doivent être en fusion. Sa surface est composée de matières solides ayant un poids spécifique moins considérable; les plus lourdes se trouvent à une plus grande profondeur, et souvent dans les mines, nous les trouvons à un état qui prouve qu'elles ont été volatilisées. Sous ce rapport, nous trouvons quelque chose d'analogue avec la disposition des substances qui composent le Soleil. Du reste, la densité moyenne du globe est beaucoup plus grande que celle des matériaux qui

composent son écorce; il faut donc bien que l'intérieur contienne des substances ayant une densité plus considérable.

Mars. — Cette planète possède aussi une atmosphère, mais si mince qu'elle permet de voir les continents beaucoup mieux encore que sur Vénus (*fig.* 106 et 107). Près des pôles, on voit des taches blanches

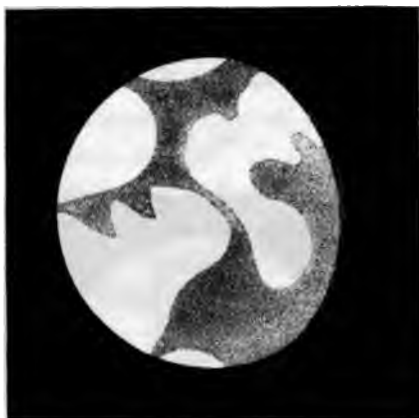
Fig. 106.



qui vont en croissant et en décroissant, suivant les saisons, ce qui prouve que ce sont des amas de neige ou de nuages. Dans la saison d'hiver, ces taches prennent un grand développement; mais en été, elles se réduisent à une calotte peu étendue. Les taches plus éloignées des pôles nous offrent une double couleur, rouge et bleue, parsemée quelquefois de jaune ou de blanc. Les taches bleues, en présentant des teintes plus sombres, correspondent aux mers, le rouge aux continents, le jaune aux nuages, ce jaune n'étant que

le résultat du contraste dû à la juxtaposition du blanc et des autres couleurs. Une partie du rouge est éga-

Fig. 107.



lement dû à des effets de contraste; mais cette couleur doit aussi tenir aux matériaux qui composent la surface de la planète. Dans ces vastes étendues, on voit quelquefois apparaître des taches blanches : ce sont des nuages. Quelquefois même on aperçoit des tourbillons bien contournés en spirales; ce sont sans doute des bourrasques. La révolution est de $1^a 321^j,7$; la rotation a lieu en $24^h 37^m 23^s$. L'année étant plus longue que sur la Terre, l'axe plus incliné sur le plan de l'orbite ($30^\circ 18'$), l'excentricité étant plus considérable, les saisons doivent offrir des différences bien plus tranchées. La radiation solaire y est 0,43 de celle que nous éprouvons; la masse totale est 0,13 de celle de la Terre.

Petites planètes. — Nous savons encore bien peu

de chose sur la constitution physique de ces astéroïdes. Leur volume est très-petit, et il n'y en a pas un seul qui soit aussi gros que la Lune. A en juger par l'éclat dont ils brillent, les plus considérables doivent avoir des dimensions qui permettent de les comparer à la Sicile; mais les plus récemment découverts sont tellement petits qu'ils semblent servir de transition entre les planètes et les aérolithes. Leurs masses sont également très-faibles. Ils sont si nombreux, leurs orbites se croisent en tant de points qu'un choc ne serait pas impossible, comme l'a très-bien montré M. Littrow de Vienne. Ce choc les briserait infailliblement et pourrait donner naissance à des aérolithes. Nous avons déjà dit que leurs masses réunies ne forment pas le tiers de la masse terrestre.

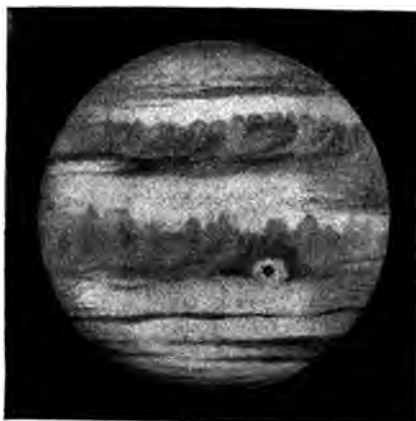
JUPITER. — C'est la plus grosse de toutes les planètes. Sa masse est $\frac{1}{1060}$ de celle du Soleil, ou 334 fois celle de la Terre; elle est trois fois plus considérable que celle de toutes les autres planètes réunies. Aussi est-il incontestable qu'elle a dû exercer une influence assez grande sur la formation des planètes plus voisines, en particulier sur celle des petites planètes. Jupiter est entouré d'un magnifique cortége de quatre satellites, dont le plus petit dépasse de beaucoup la Lune, et dont le plus gros présente des dimensions qui permettent de le comparer à la planète Mars. La *fig.* 108 représente leur grandeur relative.

Fig. 108.



Le volume de Jupiter est 1500 fois plus considérable que celui de la Terre, mais sa densité est beaucoup plus faible ; elle est égale à 1,29, moindre que celle du Soleil et à peine plus grande que celle de l'eau. La gravité à sa surface est deux fois et demie plus considérable qu'à la surface de la Terre ; il doit en résulter une pression très-considérable, circonstance qui, jointe à la faible densité que nous venons de signaler, ne permet pas de croire que cette planète soit à l'état solide. Son aspect annonce d'ailleurs de très-grandes agitations, et les zones qu'on y observe sont loin d'offrir un système simple et stable. Nous avons déjà parlé de leurs variations dans le paragraphe précédent. La *fig.* 109

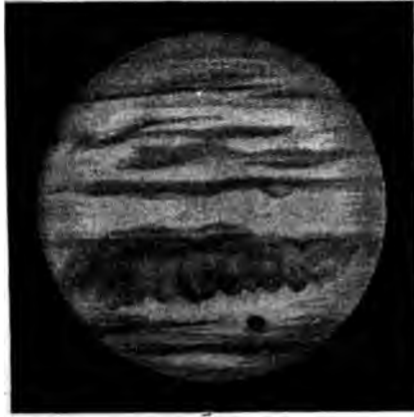
Fig. 109.



représente l'aspect qu'offrait Jupiter le 10 octobre 1856 ; on y voit une grande tache noire qui n'est pas l'ombre d'un satellite, et qui ne saurait être qu'une ouverture faite dans une couche de nuages, sans doute par un ouragan. La *fig.* 110 (6 décembre 1857) fait voir

quelles modifications profondes ses zones peuvent éprouver dans un temps très-court. Ici la tache est

Fig. 110.



l'ombre d'un satellite. L'axe de rotation étant très-peu incliné sur le plan de l'orbite, ces modifications ne sauraient être attribuées au Soleil, car les saisons doivent être peu variées. L'atmosphère très-dense doit être encore le siége de révolutions analogues à celles que la Terre a subies elle-même aux époques géologiques; nous avons déjà fait remarquer que sa composition est différente de celle de l'atmosphère terrestre.

L'année de Jupiter dure $11^a 314^j,834$; sa rotation dure $9^h 55^m 26^s,5$. Cette rotation, si rapide dans un corps aussi voluminenx, développe une force centrifuge très-considérable, d'où il résulte un aplatissement très-grand et très-facile à constater.

Saturne. — Cette planète est la plus grande après Jupiter. Sa masse est $\frac{1}{3510}$ de celle du Soleil, 102 fois

celle de la Terre. Son volume est proportionnellement très-grand, car sa densité est seulement égale à 0,73, de sorte qu'on peut lui appliquer à plus forte raison ce que nous venons de dire de l'état nébuleux de Jupiter. On est confirmé dans cette opinion par les bandes nombreuses que présente sa surface, et par les zones d'absorption que présente son spectre, et qui sont encore plus fortes que celles de Jupiter. Ses pôles ont une couleur approchant du bleu, tandis que l'équateur est d'un blanc éclatant.

Saturne possède le plus beau cortége qui existe dans notre système solaire : outre huit satellites, dont le plus gros est comparable à la planète Mars, il est entouré de ce merveilleux anneau qui subsiste là comme pour témoigner de l'origine de tout le système solaire, et pour confirmer l'exactitude des hypothèses que nous avons précédemment exposées. Cet anneau est très-mince, proportionnellement à sa largeur. Il se compose, en réalité, de trois anneaux distincts et séparés; le plus extérieur (*fig.* 111) est un peu sombre, le suivant est plus brillant, le troisième est tout à fait nébuleux et transparent. Les contours de l'ombre de la planète sur l'anneau nous prouvent que les surfaces de ces anneaux sont courbes, et que leurs génératrices sont des ellipses. On y voit de grandes différences d'intensité lumineuse qui accusent des irrégularités très-remarquables dans la densité et dans la composition des différentes parties.

L'année de Saturne est de $29^{a}\,166^{j},97$, et comme l'anneau est incliné sur notre écliptique de $28^\circ 10' 44''$, la Terre se trouve tous les quinze ans dans son plan, au moment où il passe à ses nœuds qui sont situés

à 166° 53′ et 346° 53′ de longitude. Alors l'anneau n'est visible que par sa tranche, et on l'aperçoit comme

Fig. 111.



un mince filet très-délié dépassant la planète de part et d'autre. La figure, au contraire, le représente dans la position la plus favorable, la plus écartée de celle que nous venons de décrire.

L'équateur de la planète coïncide avec l'anneau, et il est incliné de 26° 48′ 40″ sur le plan de l'orbite. La chaleur du Soleil y est seulement égale aux 0,011 de celle que nous recevons. Vu de la planète, l'anneau présente des phénomènes singuliers, et il produit des occultations diurnes du Soleil très-variables suivant les latitudes; mais à part quelques zones peu étendues, il ne produit pas d'éclipse permanente. Il n'est peut-être pas complétement opaque, et sa constitution pourrait bien être comparable à celle de nos nuages. Nous

avons constaté qu'il est légèrement elliptique, et qu'il fait sa révolution en $14^h 12^m$ environ; c'est le temps nécessaire, d'après la théorie, pour la révolution d'un satellite dont la distance à la planète serait égale à la distance moyenne de l'anneau. Quant à la planète, sa révolution se fait en $10^h 20^m 17^s$.

Les satellites, au nombre de huit, sont tous extérieurs à l'anneau. Les plus rapprochés sont très-petits, les plus grands sont plus éloignés. Nous renverrons pour plus de détails à notre ouvrage intitulé : *Tableau physique du système solaire*.

URANUS. — Nous savons fort peu de chose sur cette planète. Comme toutes les planètes extérieures aux astéroïdes, elle a une densité très-faible (0,82), et son atmosphère jouit d'un pouvoir absorbant très-considérable. Nous avons étudié son spectre, et nous l'avons trouvé très-différent de celui du Soleil et très-analogue à celui des comètes. La *fig.* 112 représente

Fig. 112.



l'intensité de la lumière dans ses différentes parties. Le jaune y fait complétement défaut. Dans le vert et dans le bleu il y a deux raies très-larges et très-noires qui n'existent pas dans le spectre solaire; aussi serait-on tenté de croire qu'elle est un peu lumineuse par elle-même.

La masse d'Uranus est seulement égale à 22 fois celle de la Terre. Cette planète possède quatre satellites dont l'existence est bien constatée; le plan de leur orbite est très-incliné sur celui de la planète.

Nous ignorons la durée de sa rotation, et nous ne connaissons pas davantage la direction de son axe. Sa révolution est de 84ª 5ʲ,83.

NEPTUNE. — Cette planète est célèbre parce que sa découverte a été un véritable triomphe pour le principe de la gravitation. Son diamètre est 6 fois plus grand que celui de la Terre. Sa densité n'est pas bien connue, mais elle est très-faible, et son volume est plus considérable que celui d'Uranus. Sa couleur verte, analogue à celle de l'eau de mer, montre que son atmosphère exerce une forte absorption sur les rayons solaires; ce fait est confirmé par les observations faites au spectroscope. Le vif éclat dont brille cette planète, malgré l'énorme distance du Soleil, pourrait même faire croire qu'elle est un peu lumineuse. Nous n'avons jamais vu son contour bien nettement terminé, ce qui s'accorderait parfaitement avec l'hypothèse d'un état nébuleux. Sa masse est $\frac{1}{15000}$ de celle du Soleil. Elle possède un satellite qui fait sa révolution en 5ʲ,877, et dont le mouvement est rétrograde. Nous ne connaissons pas la durée de sa rotation; sa révolution s'exécute en 164ª 225ʲ,7.

Telles sont les principaux corps célestes qui font partie du système solaire; ce sont les seuls que nous connaissions, mais nous ne saurions affirmer qu'il n'en existe pas d'autres. On a soupçonné l'existence d'une planète dont l'orbite serait intérieure à celle de Mercure; on a même fait beaucoup de bruit d'une observation due à M. Lescarbaut, mais que rien n'est venu confirmer, quoique, à plusieurs reprises, on ait vu sur le disque du Soleil des points noirs animés d'un mouvement assez rapide. On a fait beaucoup de re-

cherches à ce sujet, surtout pendant l'éclipse de 1869, mais on n'est arrivé à aucun résultat. S'il y a quelque autre planète au delà de Neptune, son existence pourra nous être révélée par les perturbations qu'elle doit exercer; on pourra bien la découvrir par une observation attentive des petites étoiles, mais cette découverte demandera beaucoup de temps, car, son mouvement devant être très-lent, on la confondra pendant longtemps avec les étoiles fixes, comme il est arrivé pour Neptune.

SATELLITES. — Parmi ces corps de troisième ordre de notre système, nous ne connaissons bien que celui qui accompagne la Terre, c'est-à-dire la Lune. Les accidents de sa surface sont bien connus, et nous ne nous arrêterons pas à en faire la description (1). La forme des cratères qui sont répandus sur sa surface prouve d'une manière évidente que jadis l'action expansive des masses incandescentes qu'elle contenait dans son sein y a produit de graves convulsions. Nous ignorons si cette activité dure encore, car il n'y a pas de preuve certaine de changement dans la forme de ses cratères, ni aucun autre signe d'explosion ou d'éruption. Actuellement, notre satellite est privé de toute atmosphère sensible, et il n'y a point d'eau à l'état liquide sur sa surface; mais on ne peut pas assurer qu'il en ait toujours été ainsi. On voit des corrosions manifestes dans certains cratères voisins des plaines qu'on désigne sous le nom de *mers*. Ces mers ne sont pas remplies d'eau liquide; comme elles sont

(1) Voici deux dessins qui donnent une idée du cratère connu sous

assez sombres et qu'elles polarisent fortement la lumière, il pourrait se faire qu'elles fussent remplies par des glaciers.

---

le nom de *Copernic*. La *fig.* 113 le représente tel qu'on le voit le

Fig. 113.



Il est donc évident que la Lune a passé jadis par les périodes géologiques que la Terre traverse aujourd'hui, mais comme sa masse est très-petite, elle s'est refroidie plus rapidement. A en juger par les apparences cratériformes qu'elle présente sur toute sa surface, à l'époque de ses dernières révolutions, elle devait être recouverte d'une croûte solide d'une faible épaisseur, cédant facilement à toutes les expansions locales qui provenaient de l'intérieur, sans produire de vastes déformations analogues à celles qui, à la surface de la Terre, ont produit de si longues chaînes de montagnes. De plus, sur la Terre, les montagnes sont en grande partie produites par des érosions dues aux agents atmosphériques. Dans la Lune, cette cause fait défaut ou son action est très-faible, et, par conséquent, l'aspect doit être très-différent. La faible résistance de cette croûte est due en partie à ce que la pesanteur est peu considérable (0,16 seulement de la pesanteur à la surface de la Terre), et en partie à la faible densité des matériaux qui la composent : cette densité est 3,40.

La Lune tourne toujours le même hémisphère vers la Terre, de sorte que sa révolution et son mouve-

---

dixième jour de la Lune. La *fig.* 114 est une coupe verticale faite à

Fig. 114.



travers ce même cratère; afin de mieux indiquer le relief, on a exagéré la hauteur, mais elle est exactement indiquée par la ligne noire.

ment de rotation s'exécutent dans le même temps. Cette particularité montre que le centre de gravité de notre satellite est placé en dehors du centre de figure, ou bien que sa figure est un ellipsoïde à trois axes inégaux. Les observations ont confirmé cette conclusion, et elles ont montré que le plus grand des trois axes est celui qui est dirigé vers la Terre.

Le diamètre de la Lune est très-considérable, car il égale les 0,27 de celui de la Terre; sa masse est égale à $\frac{1}{77}$. Pour tous les autres satellites, ces proportions sont beaucoup plus petites. En revanche sa distance à la Terre est assez grande, presque 60 rayons terrestres, et à l'exception du dernier satellite de Saturne, il n'y a pas d'exemple d'une distance aussi grande entre une planète et son satellite.

On a cru que tous les satellites, à l'exemple de la Lune, tournent toujours la même face à leur planète; mais jusqu'à présent rien n'autorise à regarder cette loi comme générale. Nous avons pu constater la rotation des satellites de Jupiter, grâce aux taches qui se trouvent à leur surface, et M. Dawes a confirmé les résultats de nos observations. Quoique nous ne puissions pas fixer exactement la durée de leur rotation, nous pouvons cependant affirmer qu'elle n'est pas égale à la durée de leur révolution. La loi ne s'applique donc certainement pas à Jupiter; elle se vérifie probablement pour quelques-uns des satellites de Saturne. Mais il est difficile de rien dire sur la constitution physique de ces astres de troisième ordre autres que la Lune. On a cependant observé une particularité très-remarquable, c'est que les durées de leurs mouvements sont commensurables, surtout pour le système

de Jupiter, et qu'il y a un rapport assez simple entre le nombre qui mesure leur révolution et celui qui mesure leur rotation; rapport qui, pour la Lune, est aussi simple que possible, puisqu'il est égal à l'unité. Quelques satellites ont des vitesses énormes. Le premier satellite de Saturne, par exemple, parcourt en 22 heures une orbite presque égale à celle que la Lune parcourt en un mois.

§ III. — *Les comètes.*

Les comètes forment une partie importante du cortége solaire; mais proviennent-elles de la même nébuleuse, ou bien dérivent-elles d'une source étrangère? Cette question, posée depuis si longtemps, semble maintenant assez facile à résoudre. Leurs formes étranges, leur marche qui a lieu dans toutes les directions, et souvent en sens contraire de celle des planètes, leurs orbites très-inclinées sur l'écliptique et souvent perpendiculaires à ce plan fondamental sont autant de preuves qui tendent à leur assigner une origine étrangère. Si donc nous les étudions, c'est qu'elles nous présentent des particularités instructives, et qu'elles peuvent nous donner l'explication de phénomènes importants.

On divise communément les comètes en deux catégories, relativement à l'étendue de leurs orbites. Les comètes périodiques sont celles dont la révolution s'accomplit dans les limites du sytème solaire; elles ont toutes des orbites elliptiques très-allongées. On en connaît six ou sept. La plus célèbre est celle de Halley, qui accomplit sa révolution en 75 ans; les

autres ont des périodes de 5 à 6 ans seulement; celle de Encke, dont la période est la plus courte, accomplit sa révolution en 3 ans environ.

La seconde catégorie, la plus nombreuse de beaucoup, contient les comètes dont les orbites sont paraboliques. A dire vrai, il n'est pas probable que ces astres décrivent rigoureusement des paraboles; ils tracent sans doute des ellipses si allongées ou des hyperboles tellement déterminées que nous les confondons avec des paraboles dans la partie très-restreinte de leur course où nous pouvons les voir. Si, en entrant dans la sphère d'attraction du Soleil, elles possédaient des vitesses très-grandes, elles doivent décrire des hyperboles; si au contraire leur vitesse était nulle ou très-faible, elles doivent parcourir des paraboles ou des ellipses très-allongées. Il faut observer que si l'orbite d'une comète s'étendait jusqu'à ces régions de l'espace où l'attraction du Soleil est égalée par celle de quelque autre étoile, aussi rapprochée qu'on puisse la supposer, sa révolution aurait une durée d'au moins un million d'années! Il serait donc impossible de distinguer si son orbite est parabolique ou elliptique. Cependant, une fois entrée dans le domaine du Soleil, elle pourrait y être retenue par l'action perturbatrice des grandes planètes; leur attraction pourrait modifier complétement la forme et même la nature de son orbite, et abréger la durée de sa révolution en lui faisant décrire une ellipse à courte période. C'est ce que M. Le Verrier a démontré pour la comète dite de Lexell, pour celle de Vico et pour plusieurs autres.

La forme des comètes excite surtout l'étonnement

du peuple et attire l'attention des savants. Leur apparition souvent soudaine n'est qu'un effet de la position de leur orbite par rapport à l'horizon; elles peuvent, à cause de la rapidité de leur mouvement, passer en très-peu de temps d'un hémisphère dans l'autre. Ainsi, la comète de 1861 apparut en Europe d'une manière soudaine; mais elle était visible depuis quelques semaines dans l'autre hémisphère. Celle de 1842 sortit à l'improviste des rayons solaires, mais peu de jours auparavant on l'avait vue très-près de cet astre...

En général, lorsqu'une comète apparaît d'abord au fond de l'espace, se dirigeant vers le Soleil, elle ressemble à une faible nébuleuse ronde ou ovale. En approchant du Soleil elle paraît grossir, et développer une partie intérieure plus brillante qu'on appelle le *noyau*. Ce noyau est entouré d'une atmosphère vaporeuse, ordinairement allongée et dissymétrique, dont le côté le plus étroit est tourné vers le Soleil. Telle est la forme définitive des petites comètes; mais, en s'approchant du périhélie, les plus grandes donnent naissance à des jets lumineux qui semblent s'élancer du noyau vers le Soleil, se recourbent ensuite pour former en arrière, à peu près à l'opposé du Soleil, une traînée lumineuse qu'on appelle la *queue* de la comète. Le maximum d'éclat se présente quelques jours après le périhélie; à partir de ce moment l'astre devient moins lumineux, les jets disparaissent, la queue se dissipe, et la comète reprend de nouveau l'aspect d'une simple nébulosité qu'elle présentait au commencement de son apparition. Telle est l'histoire de toutes les grandes comètes, celle

de 1858 (*fig.* 115 et 117), celle de 1861 (*fig.* 116) et celle de 1862.

Fig. 115.



Grande comète de 1858 dessinée par Bond.

Arrivons maintenant à des particularités de la dernière importance. D'abord la densité des comètes est très-faible; même à travers les parties les plus brillantes, on peut facilement apercevoir des étoiles de neuvième et de dixième grandeur. Le noyau lui-même n'est pas solide; il est composé d'une masse vaporeuse; car, en 1861, on l'a vu augmenter et diminuer avec une si prodigieuse rapidité qu'on ne pouvait nullement expliquer ces modifications par la variation de la distance. Sa figure constamment ronde prouve bien qu'il était transparent, car dans les positions qu'il occupait, il aurait dû présenter des phases; or on n'a jamais observé sûrement rien de semblable; les phases dont parlent quelques observateurs

Fig. 116.



Grande comète de 1861.

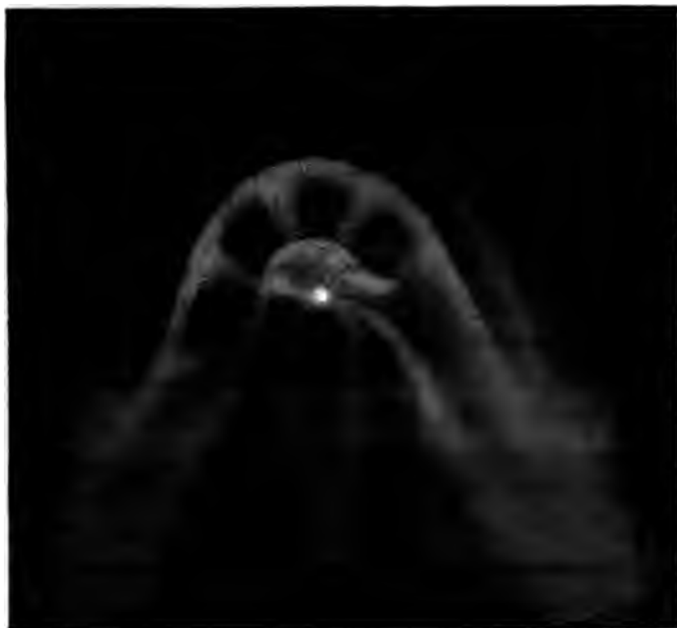
anciens ne sont que les jets lumineux que nous avons décrits plus haut, qui constituent comme un éventail ressemblant à un croissant.

Les jets lumineux sont plus ou moins irréguliers; quelquefois même ils reparaissent périodiquement, comme on l'a remarqué en 1862; dans cette comète, un jet lumineux se formait au moment où le premier venait de disparaître, et lorsque le second semblait épuisé, le premier reparaissait à son tour. En 1858 et en 1861, il y avait un grand nombre de ces jets qui, arrivés à une certaine hauteur, formaient un halo ou un arc brillant se prolongeant en [illegible] jusque dans la queue (*fig.* 118 et 119). La lumière de ces astres, toujours pâle et blafarde, prouve qu'ils ne sont pas assez denses pour réfléchir la lumière comme les planètes.

Les dernières comètes ont été examinées au spectroscope, et elles ont donné un spectre discontinu : leur lumière se réduit en général à quelques bandes vertes, jaunes et rouges séparées par des lacunes. Dans celle de Winnecke, juin 1868, le maximum de pouvoir éclairant se trouvait dans trois régions qui, d'après nos observations, coïncidaient avec les raies du carbone. Comment cette substance,

renommée pour sa fixité, pourrait-elle se trouver à l'état de vapeur dans les comètes? Nous l'ignorons

Fig. 117.



Tête de la comète de 1858 observée par Bond.

complétement. On a pensé que la discontinuité du spectre des comètes était un simple phénomène d'absorption; la découverte du spectre d'Uranus est venue confirmer cette opinion; nous ne saurions cependant l'admettre sans preuves particulières.

Des observations positives prouvent que les noyaux pourraient bien être lumineux par eux-mêmes; car leur lumière diffère de celle de la chevelure en ce

que cette dernière seule est polarisée. On peut comparer cette polarisation au phénomène qui a lieu

Fig. 118.

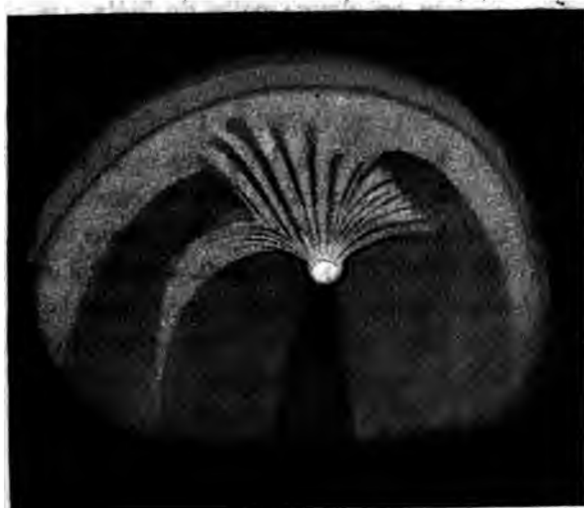


Tête de la comète de 1861 observée par l'Auteur le 1er juillet.

lorsqu'un faisceau de rayons solaires pénètre dans une chambre obscure : les rayons se polarisent alors en se réfléchissant sur les nombreuses facettes des grains de poussière qui voltigent dans l'air. Aussi a-t-on comparé les comètes à des amas de matière pondérable très-divisée. M. Tyndall a trouvé des gaz qui, étant amenés à un état d'extrême raréfaction, réfléchissent la lumière par une espèce de phosphorescence spéciale qui les rend lumineux et leur fait émettre de la lumière polarisée. Mais il n'y a pas là

une simple réflexion; y aurait-il un phénomène de fluorescence?

Fig. 119.



Tête de la comète de 1861 observée par l'Auteur le 30 juin.

Les comètes étant composées d'une matière très-fluide, gaz ou poussière cosmique, il n'est pas étonnant qu'en s'approchant du Soleil, en subissant l'action directe de ses rayons qui les pénètrent et les échauffent, elles se dilatent d'autant plus facilement que cette dilatation n'éprouve qu'une résistance très-faible de la part de la gravité. En effet, on a calculé qu'à une très-petite distance de la surface cométaire, le noyau exerce une attraction plus faible que celle du Soleil, de sorte que dans l'intérieur même de la chevelure, la première de ces deux forces est négligeable par rapport à la seconde. Cette expansion une fois produite par la chaleur, la masse doit donc se disperser dans l'espace, sans que l'attraction du noyau soit ca-

pable de la ramener. C'est ce qu'on voyait dans la comète de 1868 dont la queue laissait échapper des zones lumineuses (*fig.* 115). On a même vu des comètes se diviser en deux; celle de Biéla, en 1846, nous présenta ce phénomène qu'on avait déjà vu du temps de Kepler.

Ces astres errants ne présentent donc aucune fixité dans leur forme. Quant à leur masse, il ne faudrait pas la croire complétement nulle. La comète de 1861 avait une masse au moins égale à celle de 58 mètres cubes d'eau, et tout au plus équivalente à celle de l'atmosphère terrestre. Si une masse semblable venait à tomber tout entière sur une planète, elle ne laisserait pas que d'avoir quelques mauvaises influences; mais, vu le volume considérable de la comète, la planète la traverserait facilement, et son influence ne pourrait jamais être très-grande; tout au plus verrait-on dans l'atmosphère une pluie de poussière ou d'étoiles filantes (1).

Les astronomes se sont donné bien du mal pour tâcher d'expliquer la forme des comètes. Il est certain que ces formes bizarres sont en partie l'effet de l'attraction combinée avec la chaleur solaire. La masse de la comète étant très-petite, il s'ensuit qu'à une très-faible distance du noyau la force dominante est l'attraction du Soleil et non celle de la comète elle-même. La radiation solaire échauffe la masse, la dilate, et emporte les molécules en dehors de la sphère attrac-

(1) Nous écrivions ces paroles en 1861, et nous étions loin de supposer qu'elles dussent être sitôt justifiées comme elles l'ont été par la découverte de M. Schiaparelli dont nous parlerons bientôt.

tive du noyau, et alors elles deviennent comme des masses distinctes et sans liaison entre elles, devant suivre leur route indépendamment de l'astre dont elles faisaient naguère partie. Or le calcul nous apprend que les particules qui sont poussées par la dilatation vers la partie extérieure transforment dans ce cas leur orbite parabolique en une orbite hyperbolique peu différente de la précédente; celles qui sont poussées vers le Soleil la transformeront en une ellipse; la masse se trouvera ainsi dispersée à l'intérieur beaucoup plus qu'à l'extérieur, et par suite l'une des deux branches pourra rester visible pendant que l'autre pourra disparaître en raison même de son épanouissement.

Cette théorie n'explique cependant pas certaines émissions violentes, ni les rebroussements de jets lumineux qu'on a observés dans les dernières comètes. Il paraîtrait que le Soleil agit dans cette circonstance d'une manière inconnue; il semble exercer une action répulsive dont il est bien difficile de rendre compte, mais qui n'est pas sans exemple dans la nature. Si le Soleil agit à la manière des aimants, il peut, par une action diamagnétique, repousser plusieurs substances: c'est ainsi que la flamme d'une bougie et l'hydrogène pur sont repoussés dans la sphère magnétique d'un fort aimant. On a aussi invoqué la présence de l'éther qui pourrait, en effet, agir d'une manière à nous inconnue sur cette masse échauffée et réduite à un état de division extrême, et nous sommes bien loin de connaître l'influence de ce milieu dans l'univers.

La conclusion générale de toutes ces observations, c'est que les comètes sont très-probablement de sim-

ples amas d'une matière nébuleuse étrangère à celle qui a constitué notre système, et qui, entrés une fois dans les limites de l'attraction solaire, y sont retenus par l'action perturbatrice des planètes, jusqu'à ce que l'action diffusive de la chaleur solaire les ait peu à peu dispersés dans l'espace. Cette théorie recevra une confirmation frappante de ce que nous allons dire du phénomène des étoiles filantes, d'après les découvertes récentes de M. Schiaparelli.

§ IV. — *Les étoiles filantes.*

1° Il n'y a pas un seul de nos lecteurs qui n'ait aperçu, par une belle soirée d'été, quelqu'un de ces brillants météores, qui s'allument instantanément dans le ciel, et semblent se détacher de la voûte du firmament pour se précipiter vers la Terre, en laissant une traînée lumineuse qui s'évanouit bientôt. Ce phénomène, bien qu'il se présente à peu près toutes les nuits, prend cependant des proportions plus considérables à certains jours, dont le retour périodique a fortement attiré l'attention des savants. Les époques les plus remarquables sont la nuit du 10 août et le matin du 14 novembre. Ces dates fixes nous interdisent toute théorie qui chercherait à attribuer ce phénomène à une cause météorologique. L'apparition du mois d'août dure plusieurs jours, et elle a son maximum le 10; celle de novembre n'a lieu que dans la matinée du 14. Dans cette dernière, les météores sont si nombreux, qu'on les a comparés à des pluies de feu. Depuis 1833, on a étudié les récits des anciens chroniqueurs, et on a reconnu que les pluies de feu qui

ont, à certaines époques, jeté l'épouvante parmi les populations, n'étaient autre chose que l'apparition d'étoiles filantes de novembre. Cette apparition n'est pas également remarquable chaque année, mais son éclat varie périodiquement; le maximum revient à peu près tous les trente-trois ans; elle se renouvelle ensuite pendant plusieurs années, puis elle cesse de se faire remarquer pendant une longue période, pour se reproduire plus tard et repasser de nouveau par le maximum au bout de trente-trois ans. L'apparition du mois d'août est plus constante, mais elle n'est jamais aussi brillante.

2° On a constaté que les trajectoires des différents météores divergent d'un même point du ciel qu'on appelle le *point rayonnant*. Ce point se trouve entre les constellations de Persée et de Cassiopée pour les météores du mois d'août, et pour ceux de novembre il se trouve dans celle du Lion, tout près de l'étoile ζ. Il ne faut pas croire que toutes les étoiles filantes partent, en réalité, du même point du ciel, mais leurs trajectoires prolongées se rencontrent toutes en un même point, sauf un petit nombre qu'on désigne sous le nom d'étoiles *sporadiques*. Cette convergence est un effet de perspective : les trajectoires véritables sont sensiblement parallèles, mais elles paraissent converger d'après la même loi qui nous montre comme divergents les rayons du Soleil qui passent entre les nuages.

3° On a constaté que, même dans les apparitions moins remarquables et moins connues, il y a souvent un point du ciel d'où semblent diverger les météores. M. Heis, MM. Grey et Al. Herschel en ont fixé un assez grand nombre.

Ces phénomènes sont certainement dus à l'inflammation de quelque matière combustible dans les régions supérieures de notre atmosphère. Dans l'apparition de novembre, on a souvent constaté de petits nuages qui persistent quelque temps après la disparition des météores et qui sont entraînés par les courants atmosphériques. Ces masses sont très-légères, et la chaleur développée par la résistance que l'air oppose à leur mouvement suffit pour effectuer leur combustion d'une manière complète. Ce développement de chaleur n'est pas surprenant, si on songe à la vitesse prodigieuse qu'elles possèdent. En une fraction de seconde, elles parcourent des espaces extrêmement grands; on estime que leur vitesse est égale à 30 ou 40 kilomètres par seconde.

On a fait en Allemagne et en Angleterre de nombreuses observations afin de déterminer la hauteur à laquelle se produisent ces météores. Nous avons nous-même fait des observations semblables entre Rome et Civita-Vecchia, stations distantes de 60 kilomètres et reliées par un fil télégraphique. La plus grande hauteur observée est de 200 kilomètres, la plus petite est de 50. Les plus beaux météores apparaissent à une hauteur comprise entre 90 et 100 kilomètres; ils s'éteignent à une hauteur comprise entre 30 et 50 kilomètres.

4° Dans toutes les apparitions, on trouve une période diurne et une période annuelle. Dans la période diurne, le maximum a lieu de 3 à 6 heures du matin. La période annuelle consiste en ce que les météores sont plus nombreux dans la seconde partie de l'année que dans la première. D'après une théorie établie par

M. Schiaparelli, ces deux circonstances remarquables dérivent de ce que la Terre rencontre les essaims de matière météorique plus directement le matin que le soir, et pendant le second semestre que pendant le premier. Nous pouvons, en effet, comparer la Terre passant à travers un essaim de ces corpuscules à un boulet de canon qui traverserait un essaim de moucherons; il en rencontrera un bien plus grand nombre dans sa partie antérieure, et laissera un véritable vide derrière lui. Et si le boulet tourne sur lui-même, comme la normale à la surface qui est dirigée dans le sens du mouvement varie d'une manière continuelle, les points situés en avant, et qui par là se trouvent plus exposés aux chocs, varieront de la même manière. Le nombre horaire des étoiles filantes dépendra donc du point vers lequel la Terre se dirige à chaque instant, par rapport à la verticale de l'observateur : il sera maximum lorsque ce point sera aussi voisin que possible du zénith. Tout ce que nous venons de dire suppose une distribution uniforme des corpuscules météoriques; pour les étoiles systématiques, il y aurait lieu d'introduire d'autres considérations. Les observations et le calcul confirment cette théorie. Mais, comme le maximum théorique a lieu à 6 heures, c'est-à-dire après le lever du Soleil en été, on ne peut pas l'observer exactement.

Si l'on voit des étoiles dans la partie de la Terre qui est opposée à celle où a lieu le maximum, c'est que leur vitesse est plus grande que celle du globe terrestre. On avait déjà signalé ce mouvement rapide des météores, et, en partant des faits observés, M. Schiaparelli a prouvé que leur vitesse est environ une fois

et demie (1,414) celle de la Terre, ce qui leur suppose une orbite parabolique. Il en résulte un frottement et une condensation considérables lorsque ces corps pénètrent dans l'atmosphère ; de là élévation de température, incandescence, volatilisation et combustion. Analysée au spectroscope, leur lumière accuse ordinairement la présence du magnésium, du sodium et du fer. Le calcul leur donne pour vitesse maximum 71,5 kilomètres, et pour minimum 16,5 kilomètres par seconde. La moyenne de ces deux nombres diffère peu des vitesses qu'on a observées.

Les étoiles filantes sont donc de la même nature que les aérolithes; ceux-ci, étant composés d'une masse plus grande et plus compacte, ne brûlent pas complétement dans l'air; ils se fondent seulement et se vitrifient à la surface, tandis que les masses moins considérables des étoiles filantes sont complétement volatilisées. D'ailleurs, il paraît constaté que la vitesse des étoiles filantes est plus grande que celle des aérolithes, ce qui détermine un échauffement considérable. En effet, d'après M. Schiaparelli, la vitesse relative des aérolithes est égale à la différence entre leur vitesse absolue et celle de la Terre, tandis que, pour les étoiles filantes, ce serait la somme des deux vitesses. On a reconnu les mêmes substances dans les étoiles filantes et dans les météorites. L'un des plus récents contenait du charbon, corps dont la présence, ainsi que nous l'avons dit, a été reconnue dans les comètes. Ces pierres météoriques se relient donc aux étoiles filantes; il est certain que ce sont des masses étrangères au globe terrestre, et probablement aussi à notre système planétaire.

Il restait à expliquer comment et pourquoi ces apparitions reviennent périodiquement à des dates fixes, comment elles peuvent être visibles pendant plusieurs années et subir les intermittences que nous avons signalées.

Jusqu'à présent, les astronomes regardaient les étoiles filantes comme ayant une origine planétaire; on supposait qu'ils formaient des anneaux circulant autour du Soleil sur des courbes elliptiques presque circulaires, avec une vitesse comparable à celle de la Terre. Le professeur Schiaparelli, frappé de leur vitesse qui suppose une courbe parabolique, ainsi que nous l'avons fait remarquer, soupçonne qu'elles ont, aussi bien que les comètes, une origine étrangère à notre système. Exposons brièvement sa théorie.

Supposons une masse nébuleuse située à la limite de la sphère d'action de notre Soleil, et qui, douée d'un faible mouvement relatif, commence à ressentir l'attraction solaire; son volume étant très-considérable, ses points sont situés à des distances très-différentes. De là il résulte que lorsqu'elle commencera à tomber vers le Soleil, les points inégalement distants acquerront avec le temps des vitesses inégales. Malgré ce retard, le calcul prouve que les distances périhélies des différents corpuscules seront très-peu modifiées, et les orbites seront tellement semblables, que les différentes molécules se suivront l'une l'autre, formant une espèce de chaîne ou de courant qui emploiera un temps extrêmement long à passer autour du Soleil. Une masse, dont le diamètre serait seulement égal à celui du Soleil, emploierait plusieurs siècles à exécuter ce mouvement. Ce courant représentera

physiquement et visiblement l'orbite des corpuscules météoriques, comme un jet d'eau représente la trajectoire parabolique des projectiles.

Si, dans son mouvement de translation, la Terre vient à rencontrer cette espèce de procession de petits corpuscules, elle passera à travers, et un certain nombre d'entre eux la rencontreront, leur vitesse propre se combinant avec celle du globe terrestre. Si la chaîne est très-longue, la Terre la traversera ainsi chaque année au même point, rencontrant à chaque passage des corpuscules différents de ceux qui s'y trouvaient l'année précédente. Il est alors facile de calculer la position de ce courant, car son rayon vecteur est donné par la distance qui existe entre la Terre et le Soleil au moment de la rencontre; la longitude de la Terre à la même époque donne la longitude de l'un des nœuds, et comme l'orbite est parabolique, on pourra en déterminer les éléments par les procédés qu'on emploie pour l'orbite des comètes.

M. Schiaparelli a fait ces calculs pour les deux courants d'août et de novembre, et, chose étonnante, il a trouvé que deux comètes très-connues ont des orbites coïncidant précisément avec cette chaîne de météores. La première est la grande comète II[e] de 1862, qui passa au périhélie le 23 août de la même année, et dont la révolution est de cent trente-deux ans. Son orbite coïncide avec celle des météores du mois d'août. La seconde est celle de Tempel, qui parut en 1866, dont la période est de trente-trois ans, et qui fait partie des météores de novembre.

Ce résultat inattendu a jeté une grande lumière sur la nature des comètes elles-mêmes. Nous avons re-

connu par là que ces astres ne sont que de grandes étoiles filantes, ou plutôt des amas de météores dérivés de masses nébuleuses étrangères à notre système planétaire; il est donc bien vrai, comme nous l'avions dit jadis, qu'une comète, en rencontrant la Terre, produirait simplement l'aspect d'une pluie d'étoiles filantes.

Les courants de matières météoriques peuvent bien être discontinus, ou embrasser un arc limité; ainsi s'expliqueraient facilement les interruptions qui caractérisent certaines apparitions, celle de novembre, par exemple. Des courants étrangers, une fois introduits dans notre système solaire, pourraient bien y être retenus par l'action perturbatrice des planètes, qui leur ferait alors parcourir une courbe fermée; ainsi s'expliqueraient les apparitions qui se renouvellent chaque année sans interruption.

Pour qu'un de ces corpuscules météoriques produise une étoile filante, il n'est pas nécessaire que sa masse soit très-grande: on calcule que 1 gramme de matière combustible est plus que suffisant. Cependant un grand nombre d'étoiles filantes doivent avoir une masse considérable, car leurs traînées laissent parfois des nuages d'une grande étendue. Par conséquent, la masse qui constitue une comète serait beaucoup plus considérable. On a observé des comètes à noyau multiple, et, dans ce cas, il pourrait bien se faire que chaque noyau fût capable de produire une étoile filante. Le volume des comètes est quelquefois si vaste, que la Terre, en les traversant, ne ferait dans leur masse qu'une mince trouée.

La théorie de Schiaparelli explique encore quelques

phénomènes curieux signalés dans les annales de la science, par exemple certaines traînées lumineuses vues pendant une nuit seulement, et qui ont passé de l'orient à l'occident, ainsi que des lumières extraordinaires, ressemblant à des comètes, mais n'ayant qu'une faible durée. Ce n'étaient que de petites comètes ou de grandes étoiles filantes passant très-près de la Terre, sans pénétrer dans son atmosphère, et, par conséquent, sans s'y enflammer. (*Voir* sur ces questions les Mémoires de M. Schiaparelli dans le *Bulletin météorologique du Collége Romain*, 1866.)

On pourrait se demander si les aérolithes eux-mêmes ne sont pas des assemblages d'étoiles filantes. La constitution de certaines pierres météoriques paraît favorable à cette hypothèse, car elles présentent ordinairement une réunion de plusieurs petits noyaux de métal pur (mélange de fer et de nickel), entourés d'autres matériaux oxydés. Chaque grain pèse moins de 1 gramme, et aurait pu composer une étoile filante. Cependant il serait difficile d'admettre la même hypothèse pour les masses météoriques de fer presque pur ou de fer oxydé, qui renferment dans leurs pores de l'hydrogène condensé. On voit là une preuve de la haute température à laquelle ces masses ont été portées; il est probable qu'elles ont fait partie de corps plus considérables et que ce sont, en un mot, des fragments de petites planètes.

On conçoit facilement que la même masse puisse, suivant les circonstances, produire une étoile filante ou un aérolithe. Si son mouvement est dirigé en sens opposé de celui de la Terre, la vitesse relative, égale à la somme des deux autres, sera de 70 kilomètres en-

viron, et la résistance de l'air produira un grand dégagement de chaleur. Si la même masse tombe sur la Terre en marchant dans le même sens qu'elle, la vitesse relative sera la différence des deux vitesses absolues, et elle sera beaucoup plus petite, 16 kilomètres au plus, et la chaleur développée étant moins considérable, la combustion pourra n'être pas complète. Cette opinion est confirmée par la direction suivant laquelle tombent généralement les aérolithes.

Outre les deux comètes indiquées ci-dessus, on en a trouvé quelques autres, dont les orbites coïncident avec des courants de météores signalés par les astronomes: par exemple, la comète de Biéla accompagne les météores du 20 avril. Mais il ne faut pas aspirer à trouver une comète pour chaque apparition d'étoiles filantes. Les perturbations des grosses planètes sont très-considérables sur des corps aussi légers, et, depuis tant de siècles que les courants météoriques sont entrés dans notre système solaire, elles ont dû en modifier l'état primitif.

Nous nous trouvons ici en présence d'une nouvelle confirmation de la théorie nébulaire des systèmes solaires, et si quelqu'un regardait comme gratuite l'hypothèse de masses si considérables qui puissent mettre plusieurs siècles à passer auprès de nous, nous lui répondrons qu'il y a dans les vastes espaces du ciel des nébuleuses dont l'étendue est plusieurs millions de fois plus grande que celle de notre système planétaire tout entier. Il n'y a donc aucune difficulté à concevoir que ces masses de matière cosmique circulent autour du Soleil pendant un temps extrêmement long. Pour nous faire une idée du nombre des

météores, remarquons que chaque observateur, de la station qu'il occupe, ne peut voir que ceux qui tombent sur une partie très-limitée du globe. Cet espace serait représenté par une pièce de 1 franc sur un globe ayant 1 mètre de diamètre. Et cependant, dans les nuits du 10 août et du 13 novembre, on en compte plusieurs centaines en une heure à chaque station.

§ V. — *La lumière zodiacale.*

On nomme *lumière zodiacale* une faible lueur ayant la forme d'un fer de lance, que l'on aperçoit le long du zodiaque, lorsque le temps est pur, le soir, à la fin du crépuscule, et le matin avant l'aurore (*fig.* 120).

Fig. 120.



Dans les régions méridionales, cette lumière s'élève quelquefois jusqu'à une grande hauteur, mais elle atteint rarement le zénith. Son intensité et son étendue sont loin d'être constantes : elle paraît plus vive, au couchant entre février et mars, à l'orient entre septembre et octobre. A l'équateur, on la voit toute l'année, et les variations annuelles qu'elle éprouve à notre latitude dépendent évidemment de la position de l'écliptique par rapport à l'horizon. Plusieurs observateurs assurent que, même à minuit, ils la voient encore dans la partie du ciel qui est opposée au Soleil; M. Heis nous en a donné l'assurance. Nous n'avons jamais été dans des conditions favorables pour faire cette observation, car la lumière de la ville de Rome la rend extrêmement difficile.

Cette lumière est dépendante du Soleil; elle le précède et le suit constamment. Elle enveloppe les orbites de Mercure et de Vénus; elle enveloppe aussi la Terre, si l'on doit ajouter foi aux observations d'après lesquelles elle dépasse le zénith. Sa forme n'est que la figure d'un ellipsoïde très-aplati, vu par sa tranche. Il semble que ce soit une extension très-atténuée de l'atmosphère solaire; mais sa matière doit être dans un état de raréfaction extrême, car, malgré son épaisseur de près de 100 millions de lieues, elle est assez transparente pour nous laisser voir de très-petites étoiles, et elle ne produit pas de résistance sensible au mouvement de Vénus et de Mercure.

Quelle est son origine? Cette question est difficile à résoudre. C'est peut-être un reste de l'atmosphère solaire, une continuation de celle qui, pendant les éclipses, donne lieu au phénomène de la Couronne.

Mais pourquoi ne la voit-on pas pendant les éclipses? On peut répondre à cette objection que la lumière atmosphérique ayant alors un éclat supérieur à celui de la pleine Lune, la lumière zodiacale doit être complétement effacée par ce contraste. Quelques savants pensent, et cette opinion paraît la plus probable, que ce phénomène est dû à une matière météorique, étoiles filantes et matière cométaire, qui se dirige lentement vers le Soleil. Nous avons vu, en effet, que la matière des comètes se disperse lentement dans l'espace, et elle doit, sans doute, se diriger peu à peu vers le centre général d'attraction.

Nous ne possédons pas encore de données positives qui nous permettent d'opter entre ces deux hypothèses. Mairan, dans le siècle dernier, croyait que l'atmosphère du Soleil, se mêlant à celle de la Terre, produisait la lumière zodiacale et les aurores boréales. Mais on ne peut plus soutenir cette théorie, car on sait maintenant que les aurores boréales sont des phénomènes électriques. Il y aurait cependant lieu de voir si la lumière zodiacale n'a pas de relations avec le magnétisme terrestre ou avec la période décennale des taches solaires. Si le Soleil avait une action immédiate et assez considérable sur ce phénomène, on aurait une donnée précieuse pour le relier aux phénomènes magnétiques qui s'accomplissent dans les espaces célestes. Mais M. Heis, à qui j'ai posé cette question, m'assure qu'on n'a, jusqu'à présent, rien observé qui justifie ce rapprochement.

Voilà donc un champ de recherches assez vaste, et nous ne l'épuiserons qu'après de longues et patientes observations. Ces travaux n'offrent pas de difficultés

sérieuses, mais ils demandent seulement de l'attention et de la persévérance.

Pour conclure ce Chapitre, nous voyons que la formation de notre système solaire est reliée avec l'état actuel du Soleil, que les planètes faisaient autrefois partie de la même masse nébuleuse, que les comètes sont des hôtes étrangers à cette formation, et forment une même famille avec les météores ou étoiles filantes. Toutes les parties de notre monde planétaire auraient donc une origine commune, et le système tout entier serait en communication avec les systèmes étrangers par l'intermédiaire des comètes et des météores.

Nous aurions bien des choses à ajouter sur ce sujet important, si nous ne craignions pas de sortir de notre cadre; contentons-nous de renvoyer encore une fois à notre *Tableau du système solaire*, ainsi qu'aux Mémoires si remarquables de M. Schiaparelli.





TROISIÈME PARTIE.

LES SOLEILS OU LES ÉTOILES.

CHAPITRE UNIQUE.

§ I. — *Rapport de notre Soleil avec les étoiles.*

Le Soleil qui nous éclaire n'est que l'une des nombreuses étoiles qui peuplent les espaces célestes, n'ayant rien qui le distingue de ces astres, si ce n'est la distance, relativement insignifiante, qui nous sépare de lui. S'il se trouvait transporté à la distance des étoiles les plus voisines de nous, c'est à peine si nous pourrions, à l'œil nu, l'apercevoir comme une étoile de cinquième ou de sixième grandeur; son diamètre serait tout à fait insensible, car de Neptune déjà il ne sous-tend qu'un angle de 64 secondes, et les étoiles les plus voisines de nous, même en supposant leur parallaxe annuelle égale à 1 seconde, seraient à une distance au moins égale à 206265 fois le demi-grand axe de l'orbite terrestre. Cette distance est encore trop faible, puisque les parallaxes annuelles les mieux connues sont loin d'atteindre 1 seconde; et cependant, à cette distance, la lumière emploierait trois ans et quatre-vingt-trois jours à nous arriver; elle emploie douze ans à franchir l'espace qui nous sépare de l'étoile 61 du Cygne, dont la parallaxe

est 0″,34; et cependant, pour arriver du Soleil à la Terre, il lui suffit d'un demi-quart d'heure (huit minutes quinze secondes).

Ces éléments peuvent donner une idée de l'immensité de l'espace sidéral, et montrer comment les astres sont assez éloignés les uns des autres pour que les différents systèmes soient indépendants dans leur action. L'étoile qu'on regarde comme la plus voisine de nous ne saurait agir d'une manière appréciable sur la planète la plus reculée du centre d'action, c'est-à-dire sur Neptune, car elle en est 6876 fois plus éloignée que le Soleil, et comme l'action varie en raison inverse du carré de la distance, en supposant que les deux centres d'attraction aient des masses égales, l'étoile agira sur Neptune avec une force 47 279 376 fois plus faible que celle du Soleil. Jusqu'à présent l'étoile qu'on regarde comme étant la plus voisine de notre système est α du Centaure, étoile double de l'hémisphère austral, dont la parallaxe serait 0″,88 (1), et la distance 234 400 fois la distance de la Terre au Soleil, et 7813 fois celle de Neptune.

Les étoiles qu'on appelle communément *fixes* ne sont pas absolument immobiles. Les observations ont prouvé qu'elles possèdent toutes des mouvements propres, toujours très-petits à nos yeux, mais très-sensibles pour les astronomes; il en est qui décrivent des arcs de quelques secondes seulement en un siècle, et cependant il n'en faudrait pas davantage pour changer avec le temps la face du ciel et la forme actuelle des

(1) Ce nombre est déduit des observations de Maclear, Mœsta et quelques autres astronomes.

constellations. On a trouvé dans ce mouvement une loi systématique qui s'explique parfaitement bien en supposant que notre Soleil, avec son cortége de planètes et de satellites, est animé d'un mouvement de translation qui l'emporte vers un point de la constellation d'Hercule ayant pour ascension droite 259° 30′ et pour déclinaison nord 32 degrés environ. Ce mouvement est sans doute curviligne, mais il nous est impossible de le constater, d'étudier la trajectoire qu'il décrit et de déterminer le centre où réside la force à laquelle est due ce mouvement.

Il semble au premier abord que les grandes étoiles soient distribuées sur la voûte céleste au hasard et sans aucune loi. Cependant un examen attentif montre assez facilement qu'elles occupent une zone traversée en son milieu par un grand cercle ayant l'un de ses pôles auprès de l'étoile Fomalhaut du Poisson austral. On peut s'en convaincre en disposant un globe céleste de manière à ce que cette étoile corresponde au zénith; l'horizon passera alors par les Hyades, par la ceinture d'Orion, entre Sirius et Canopus; il divisera en deux la Croix du Sud, passera près des luisantes du Centaure et par le corps du Scorpion. En montant dans l'hémisphère boréal, au-dessus de l'écliptique, ce cercle passera entre les luisantes du Serpentaire, traversera la constellation de la Lyre en touchant presque Véga; puis, après avoir passé par Cassiopée et tout près de α de Persée, il laissera la Chèvre à une petite distance. Il traverse la constellation d'Hercule tout près du point vers lequel notre Soleil est emporté avec son cortége de planètes.

Ce grand cercle coupe l'équateur à $4^h 45^m$ d'as-

cension droite, dans la constellation du Taureau près d'Aldébaran, et dans le Scorpion près d'Antarès, à $16^h 45^m$. Cette zone contient presque toutes les étoiles des quatre premières grandeurs. Elle ne coïncide pas avec la voie lactée, mais elle en est très-voisine; elle suit même pendant quelque temps la bifurcation, c'est-à-dire cette branche divergente qui se dirige vers le Scorpion.

Quoiqu'il soit absurde de prétendre fixer le centre de l'univers, nous devons cependant rechercher quels sont les rapports qui existent entre notre Soleil et les nombreux soleils qui brillent à de si grandes distances. Nous analyserons donc brièvement ce qui concerne les étoiles, leur composition et leurs systèmes, afin de nous éclairer de plus en plus sur la constitution de notre Soleil et sur la position qu'il occupe dans l'univers. Nous étudierons également ces masses de matière cosmique, ces nébuleuses qui sont des mondes en voie de formation, et qui passent actuellement par les mêmes phases que notre Soleil a parcourues autrefois.

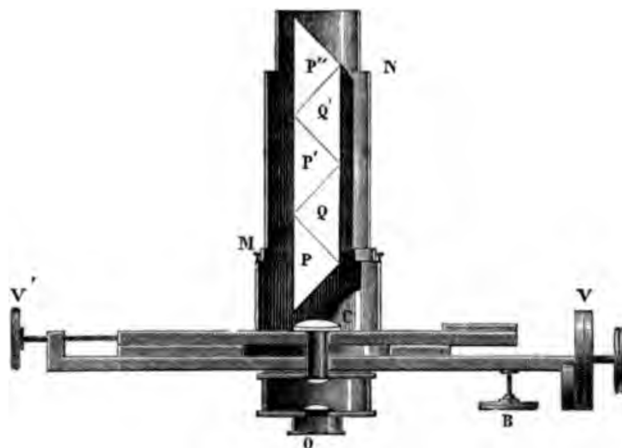
§ II. — *Relations de composition entre les soleils. Spectres stellaires.*

L'analyse spectrale peut nous faire connaître la composition chimique d'un corps de deux manières, comme nous l'avons dit en parlant du Soleil : d'abord par les rayons qu'il émet directement, en second lieu par l'absorption qu'il produit sur les ondes lumineuses. On emploie ces deux procédés dans l'étude du ciel : le premier s'applique à la plupart des étoiles; le

second s'applique aux nébuleuses et à un petit nombre d'étoiles. Entrons dans quelques détails.

Pour analyser la lumière des étoiles, on peut se servir du spectroscope que nous avons déjà décrit en parlant du Soleil; mais cet appareil absorbe une très-grande quantité de lumière, à cause de la fente étroite et des nombreuses lentilles que les rayons sont obligés de traverser; aussi en avons-nous adopté un autre. Il se compose d'un prisme à vision directe PP''(*fig.* 121)

Fig. 121.



derrière lequel est une lentille cylindrique achromatique C qui forme une image linéaire de l'étoile. On regarde cette image avec un oculaire ordinaire O formé d'une double lentille sphérique, ou mieux d'une double lentille cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de dispersion. On conserve ainsi une grande intensité lumineuse, et avec une lunette de 25 centimètres d'ouverture, nous avons pu obtenir

des spectres très-sensibles des étoiles de septième et même de huitième grandeur. Les étoiles des premières grandeurs donnent des spectres extrêmement brillants qui permettent de dessiner facilement leurs raies, et d'en mesurer la position avec exactitude. Faisons remarquer en passant qu'on peut parfaitement employer un prisme ordinaire à la place du prisme à vision directe.

C'est avec un instrument semblable que nous avons examiné les étoiles principales du ciel et même un assez grand nombre de petites. Cette étude nous a conduit à des résultats intéressants que nous allons résumer le plus brièvement possible.

Considérées au point de vue du spectre qu'elles produisent, les étoiles se rapportent à quatre types parfaitement tranchés; quelques spectres, peu nombreux, au lieu de se rapporter nettement à l'une de ces catégories, semblent servir d'intermédiaires entre elles.

Le premier type est celui des étoiles blanches, comme Sirius, Véga, Altaïr, Régulus, Rigel, celles de la Grande Ourse, à l'exception de α, celles du Serpentaire, etc. Toutes ces étoiles qu'on appelle communément *blanches*, bien qu'en réalité elles soient légèrement bleues, offrent le spectre qui est représenté dans la *Pl. II*, *fig.* 2. Il est formé de l'ensemble ordinaire des sept couleurs, interrompu par quatre grandes lignes noires, l'une dans le rouge, l'autre dans le vert-bleu, les deux dernières dans le violet. Ces quatre raies appartiennent à l'hydrogène; elles coïncident avec les quatre raies les plus brillantes que l'on distingue dans le spectre de ce gaz lorsqu'il est porté à une haute température, par exemple dans

les tubes de Geissler. Outre ces raies fondamentales et très-larges, on voit dans les étoiles les plus brillantes, comme Sirius, une raie noire très-fine dans le jaune qui paraît coïncider avec celle du sodium, et dans le vert des raies plus faibles qui appartiennent au magnésium et au fer.

La particularité la plus frappante de ce type, c'est la largeur de certaines raies, largeur qui tendrait à prouver que la couche absorbante possède une grande épaisseur et qu'elle est soumise à une pression considérable.

Dans les petites étoiles, la raie du rouge est difficile à constater, car la lumière fait défaut, mais en revanche la raie du bleu devient quelquefois très-large. En réalité, comme nous l'avons déjà fait observer, ces étoiles ont une teinte bleue; et, en effet, leurs spectres contiennent peu de rouge et de jaune; c'est le bleu et le violet qui y dominent.

La moitié à peu près des étoiles du ciel se rapportent à ce type, aussi est-il facile de l'étudier, même avec une lunette assez faible.

Le deuxième type est celui des étoiles jaunes, comme la Chèvre, Pollux, Arcturus, Aldébaran, α de la Grande Ourse, Procyon, etc. Le spectre de ces étoiles est parfaitement semblable à celui de notre Soleil, c'est-à-dire qu'il est formé de raies noires très-fines, très-serrées, et occupant la même position que celles du spectre solaire (*Pl. II*, *fig.* 1.) Toutes ces étoiles ne sont pas également faciles à étudier. Les raies noires sont extrêmement fines dans le spectre de Pollux et de la Chèvre; elles sont plus larges et plus faciles à reconnaître dans Arcturus et Aldébaran.

Cette dernière étoile pourrait même être considérée comme servant de transition entre le deuxième et le troisième type, tandis que Procyon serait intermédiaire entre le premier et le deuxième.

Nous avons dit que le deuxième type présente les mêmes raies que le Soleil : en étudiant Arcturus, nous avons constaté l'identité de trente d'entre elles choisies parmi les principales. Cette identité est telle que, en l'absence du Soleil, nous n'hésitons pas à employer les raies de ces étoiles pour contrôler les points de repère de nos instruments. Les étoiles du deuxième type ont donc la même composition que notre Soleil, et elles sont dans le même état physique que lui. Plusieurs d'entre elles paraissent donner un spectre continu, mais cela tient à la finesse des raies et à la difficulté de les distinguer; lorsque l'air est calme, on les aperçoit facilement avec de bons instruments.

Nous avons dit que le premier type contient à peu près la moitié des étoiles observées jusqu'à présent; les deux tiers de ce qui reste doivent être rangés dans la catégorie des étoiles jaunes dont nous venons de parler.

Le spectre du troisième type est assez extraordinaire; il est composé d'un double système de bandes nébuleuses et de raies noires. On peut prendre comme exemple celui de α d'Hercule. (*Pl. II, fig.* 3). En réalité, les raies noires fondamentales sont les mêmes que dans le deuxième type, comme on le reconnaît surtout dans Aldébaran et Arcturus; mais, en outre, le troisième type contient un grand nombre de bandes nébuleuses qui divisent tout le spectre et en font une

espèce de colonnade. Ces bandes, dont la largeur et l'intensité sont très-variables, forment pour les étoiles de cette catégorie des différences assez considérables. Nous avons choisi pour type fondamental α d'Hercule, car c'est cette étoile qui offre le spectre le plus régulier. Nous pouvons encore citer β de Pégase, o de la Baleine, α d'Orion, Antarès, etc. Ces étoiles sont très-remarquables, car elles sont toutes variables, et d'une couleur tirant plus ou moins sur le rouge ou l'orangé; α d'Orion (*Pl. III, fig.* 1) présente de très-grandes variations dans ses bandes, suivant sa couleur; o de la Baleine, cette célèbre étoile qu'on a appelée *la merveilleuse*, montre de véritables lacunes qui sont très-variables suivant sa grandeur.

Dans quelques étoiles plus petites, au lieu des colonnades, on voit des groupes de raies brillantes séparées par des espaces obscurs. Les zones spectrales dépendent donc des variations des étoiles, et ces variations elles-mêmes dépendent de l'action plus ou moins absorbante de leurs atmosphères. L'analyse spectrale des différentes parties du Soleil nous a appris qu'au fond des taches on obtient un spectre plus profondement rayé, et traversé par des bandes noires analogues à celles qu'on voit dans α d'Orion. Nous pouvons conclure de cette remarque que les étoiles dont nous parlons doivent leur spectre à une absorption analogue à celle qui se produit dans les taches du Soleil. Si donc notre Soleil se trouvait dépouillé de sa brillante photosphère et des feuilles ou grains lumineux qui recouvrent sa surface, il nous présenterait le même aspect que α d'Orion et les autres étoiles de la même catégorie.

Les belles étoiles de ce type ne sont pas nombreuses; les plus remarquables sont au nombre de trente environ, et en comptant celles de second ordre, nous en avons trouvé une centaine tout au plus. Nous reproduisons ici le Catalogue des plus importantes pour guider les amateurs qui voudraient les observer. Lorsque tout autre dénomination fait défaut, le numéro d'ordre est celui du Catalogue d'étoiles rouges de M. Schjellerup.

ÉTOILES du troisième type.	ASCENSION droite.	DÉCLINAISON.	GRANDEUR.
	h m	° ′	
ο Baleine	2.12,6	+ 3.37	Variable.
α Baleine	2.54,8	+ 3.32	Id.
ρ Persée	2.55,7	+ 38.15	Id.
Selv. 44	4.44,6	+ 14. 1	5
46	4.46,5	+ 2.15	5,5
59	5.24,1	+ 18.29	5,5
α Orion	5.47,6	+ 7.23	1 variable.
67	5.49,6	+ 45.55	5,6
120	9. 2,2	+ 31.32	6
nova	9.17,0	— 21.42	1
137	10.52,6	— 15.36	6
160	13.22,4	— 22.33	Variable.
162	13.42,8	+ 16.29	4
Arcturus	14. 9,1	+ 19.55	1
178	15.30,0	+ 15.34	7,5
Antarès	16.20,1	— 26. 7	1
α Hercule	17. 8,3	+ 14.33	2 variable.
nova	18.14,6	+ 25. 2,5	6
234	19.58,3	— 27.37	7,5
254	21.39,3	— 2.51	6,5
β Pégase	22.56,1	+ 27.15	2
266	23.00,0	+ 8.39	5,5
267	23.11,3	+ 48.15	
α Hydre			
δ Vierge			

Il importe beaucoup de remarquer, pour ce troisième type, que les raies principales qui séparent les colonnades se retrouvent à la même place dans toutes les étoiles. Ce fait a été constaté par un grand nombre de mesures. Les raies les plus saillantes sont celles du magnésium, du sodium et du fer qui souvent sont nébuleuses comme dans les taches du Soleil. On y retrouve aussi celles de l'hydrogène, mais elles ne dominent pas comme dans les deux premiers types. Ce gaz existe donc certainement dans les étoiles de la troisième catégorie, on avait eu tort de le nier; mais ses raies y sont partiellement renversées, comme cela arrive dans le spectre des taches. La plupart des raies dominantes appartiennent à des métaux qu'on retrouve dans le Soleil.

Le spectre du troisième type paraît être le même que celui du Soleil, ou plutôt d'Arcturus, mais profondement divisé par des bandes nébuleuses. Nous disons : *plutôt d'Arcturus*, car ces raies sont plus larges que celles du Soleil; si nous examinons en détail les lignes secondaires, nous verrons qu'Arcturus, pour la partie verte de son spectre, se sépare du Soleil et des étoiles du deuxième type, pour se rapprocher de celles du troisième; c'est pour cela que nous l'avons enregistré dans le Catalogue précédent. Notons encore en passant que ces différences sont précisément celles qu'on observe dans les noyaux; les spectres que nous étudions actuellement nous rappellent en tout le spectre des taches solaires; aussi sommes-nous de plus en plus autorisé à penser que les étoiles du troisième type et celles du deuxième diffèrent uniquement par l'épaisseur de leurs atmosphères, et par le défaut de

continuité dans leurs photosphères; elles auraient donc des taches variables comme celles du Soleil, mais dont les dimensions seraient incomparablement plus considérables.

Le quatrième type est encore plus extraordinaire, et il nous avait échappé d'abord, car il se rapporte à de petites étoiles de couleur rouge-sang qui sont assez peu nombreuses. Leur spectre (*Pl. III, fig.* 2) contient trois zones fondamentales, rouge, verte, bleue. Ces zones ne peuvent pas se réduire à celles du type précédent par la suppression alternative d'une bande nébuleuse, car quoique plusieurs lignes noires coïncident assez bien, la distribution de la lumière est tout à fait différente.

Dans le troisième type, la lumière est plus vive dans les colonnes du côté du rouge, tandis qu'ici elle est plus vive du côté opposé, c'est-à-dire du côté du violet. Cette différence est fondamentale, et il semble que l'un des deux spectres soit le *négatif* de l'autre. On remarque encore parfois des lignes brillantes très-vives (*Pl. III, fig.* 2, 3). Ces spectres peuvent présenter des différences très-grandes dans leurs détails; nous donnons comme exemple le spectre d'une étoile assez remarquable par les lacunes qu'elle présente dans le rouge et dans le jaune (*Pl. III, fig.* 3), et il nous serait facile de multiplier ces figures.

Les étoiles de ce type ne sont pas nombreuses; nous en avons trouvé une trentaine, et nous donnons le Catalogue des plus remarquables. Comme elles sont toutes très-petites, il est probable qu'on en découvrira un plus grand nombre en employant des instruments plus puissants.

NUMÉRO du Catalogue.	ASCENSION DROITE.	DÉCLINAISON.	GRANDEUR.
	h m	° '	
41	4.36,2	+ 67.54	6 belle.
43	4.42,8	+ 28.16	8
51	4.58,1	+ 0.59	6
78	6.26,9	+ 38.33	6,5 belle.
89	7.11,5	— 11.43	7,5
124	9.44,6	— 22.22	6,5
128	10. 5,8	— 34.38	7
132	10.30,7	— 12.39	6 belle.
136	10.44,8	— 20.30	6,5
152	12.38,5	+ 46.13	6 superbe.
159	13.19,3	— 11.59	7,5
163	13.47,3	+ 41. 2	7
229	19.26,5	+ 76.17	6,5
238	20. 8,6	— 21.45	6
249	21.25,8	+ 50.58	9
252	21.38,6	+ 37.13	8,5
273	23.39,2	+ 2.42	6 belle.

Quelques-unes des raies noires, et les plus importantes, coïncident à peu près avec celles du troisième type; cependant le spectre, dans son ensemble, se présente comme un spectre direct appartenant à un corps gazeux, plutôt que comme un spectre d'absorption. Si on le considère comme un spectre d'absorption, nous avons reconnu qu'il présente le caractère des composés du carbone, tels qu'on les obtient en produisant une série d'étincelles électriques dans un mélange de vapeur de benzine et d'air atmosphérique.

Quoi qu'il en soit, des mesures et des études postérieures pourront faire connaître la nature véritable de ces étoiles; nous n'avons fait jusqu'à présent que les classer en plusieurs types d'après les différences

que présentent les rayons lumineux qu'elles nous envoient.

Outre ces quatre types principaux, il y a des groupes d'étoiles qui méritent une attention particulière. Tel est celui de la constellation d'Orion; il appartient au deuxième type par l'extrême finesse de ses raies, mais en même temps il est très-remarquable par l'absence presque complète du rouge et du jaune, de sorte que toutes les étoiles de cette région présentent un double caractère : 1° elles ont une teinte verte très-prononcée; 2° les raies de leurs spectres sont si fines, qu'il est souvent difficile de les séparer. Au contraire, la région de la Baleine et de l'Éridan renferme un très-grand nombre d'étoiles jaunes. Cette distribution ne saurait être l'œuvre du hasard; elle dépend sans doute de la nature et de l'état des substances qui remplissent les différentes parties de l'univers.

Il y a une exception très-singulière formée par une cinquième classe d'étoiles très-peu nombreuses, qui nous donnent le spectre *direct* de l'hydrogène. La plus remarquable est γ de Cassiopée, qui possède deux lignes brillantes à la place des raies F et C; celles du violet sont trop faibles pour qu'on puisse les distinguer. On voit aussi dans le jaune une raie brillante qui occupe probablement la même place que la raie brillante des protubérances solaires; mais ces mesures sont très-difficiles à exécuter d'une manière précise.

Nous retrouvons encore le même caractère dans β de la Lyre, étoile variable, très-difficile à étudier. Enfin deux étoiles variables et temporaires ont pré-

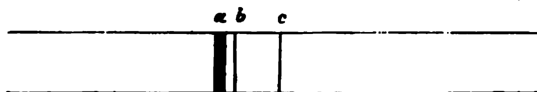
senté également un spectre direct mais discontinu, ce qui les distingue des précédentes; l'une d'elles parut en 1866 dans la Couronne ($\alpha = 15^h 53^m,9$; $\delta = + 26^\circ 18'$), l'autre est R des Gémeaux ($\alpha = 6^h 58^m,5$; $\delta = 22^\circ 55'$). Ces deux étoiles ont présenté le spectre de l'hydrogène disposé en zones, mélangé avec celui de quelques autres substances parmi lesquelles on distinguait le magnésium. Leur éclat était trop faible, et il a été trop passager pour qu'on ait pu les étudier de manière à obtenir des résultats plus complets. Ces spectres accusent évidemment une combustion rapide qui eut lieu sans doute à une époque très-reculée, mais qui se manifeste tardivement à nous, à cause de l'immense distance que la lumière a dû franchir pour parvenir jusqu'à la Terre.

On s'est demandé si Algol appartient au même type que les autres étoiles variables qui sont ordinairement colorées. Nous l'avons étudiée avec soin, et nous avons trouvé qu'elle donne constamment un spectre du premier type, de sorte que ses variations ne tiennent pas à une absorption plus ou moins grande, ni à des taches plus ou moins développées, mais probablement à un corps opaque circulant autour d'elle et produisant des éclipses partielles.

Le spectre des dernières étoiles nous montre quelque analogie avec celui des nébuleuses. Les nébuleuses résolubles, composées d'une grande quantité d'étoiles juxtaposées, ont un spectre stellaire et continu. Les nébuleuses proprement dites forment deux catégories: quelques-unes, comme celle d'Andromède, ont un spectre continu; mais la plupart ne donnent qu'un petit nombre de lignes brillantes; telles sont les né-

buleuses d'Orion, du Sagittaire, de la Lyre, et toutes celles qui sont connues sous le nom de *planétaires*. Le spectre de la nébuleuse d'Orion se réduit à trois raies : l'une *a* (*fig.* 122), dans le vert, est large et bril-

Fig. 122.



lante; la seconde *b*, plus fine, est très-voisine de la première; la troisième *c* est un peu plus éloignée. En comparant ces raies à celles des gaz, on trouve que *c* correspond à F de l'hydrogène, et que *a* appartient à l'azote. Comme ce dernier gaz présente plusieurs spectres, nous avons constaté que pour obtenir la coïncidence il faut éclairer le tube de Geissler par l'électricité à forte tension, ce qu'on obtient en introduisant une batterie dans le circuit d'induction.

Toutes les nébuleuses planétaires ont le même spectre; la raie principale est très-vive, les raies secondaires le sont moins. Une circonstance mérite d'attirer toute notre attention. Quelques nébuleuses planétaires semblent offrir des points lumineux : telles sont celles de l'Hydre (*fig.* 123)

$$(\alpha = 10^{h}\,17^{m}, \delta = -17°47')$$

et celle du Sagittaire (*fig.* 124)

$$(\alpha = 19^{h}\,34^{m}, \delta = -14°32');$$

et cependant elles donnent des spectres monochromatiques, ce qui prouve que la matière gazeuze qui

les compose peut bien se condenser jusqu'à prendre l'apparence d'une étoile, sans pourtant former un

Fig. 123.



Fig. 124.

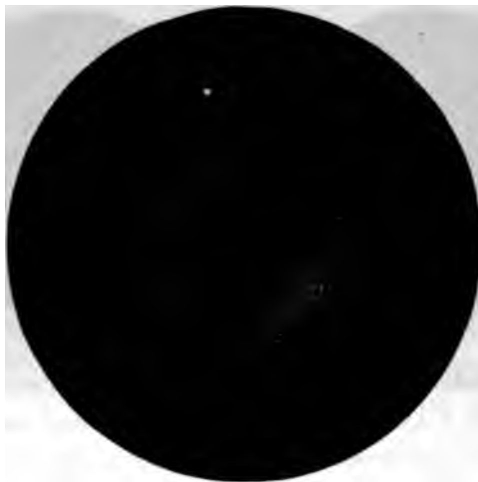


corps solide et incandescent. Cependant la nébuleuse planétaire d'Andromède, qui est réellement une étoile nébuleuse, présente les deux spectres superposés. La nébuleuse annulaire de la Lyre (*fig.* 125) donne aussi un spectre linéaire.

La théorie que nous avons exposée relativement à la formation du Soleil, que nous attribuons à la condensation successive d'une nébuleuse, n'avait d'abord été admise que sur de simples inductions; elle a été bien confirmée et pour ainsi dire démontrée par la découverte des nébuleuses gazeuses; et tout nous porte actuellement à croire que ces nébuleuses se transformeront un jour en étoiles, et que tous les astres qui brillent maintenant au firmament ont eu une origine semblable. Nous avons fait remarquer que, pour obtenir artificiellement des spectres analogues à ceux de quelques-uns de ces amas de matière cosmique, nous devons recourir aux modes de dissocia-

tion les plus efficaces que nous connaissions, par exemple l'étincelle d'induction rendue plus énergique

Fig. 125.



par l'interposition d'un condensateur; il faut en conclure que cette matière est dans un état extrême de dissociation. Nous ne pouvons cependant pas être certains de connaître complétement leur spectre; leur distance est trop grande, leur lumière trop faible et nos instruments trop imparfaits.

Si une nébuleuse vient à se condenser par l'attraction que ses différentes parties exercent les unes sur les autres, on comprend que ce mouvement produira une quantité de chaleur comparable à celle dont nous avons reconnu l'existence dans le Soleil. Ces masses cosmiques occupent des espaces immenses. La nébuleuse d'Orion, dans sa partie la plus dense, sous-tend un arc de 1 degré, mais son étendue tout entière

est bien de 4 degrés. La nébuleuse d'Argus est à peu près aussi grande. De l'autre côté du Sagittaire, nous trouvons de larges surfaces blanches qui doivent être des nébuleuses non résolubles. Il n'est donc pas étonnant que quelques-unes de ces masses se déplacent, et finissent par entrer dans notre atmosphère pour y donner naissance aux comètes et aux étoiles filantes. Cette hypothèse est parfaitement confirmée par le spectre si discontinu que présentent les comètes.

Le monde s'élargit donc à nos yeux; le système solaire ne nous paraît plus que comme un point dans l'espace. Quelle différence entre ces idées si larges et celles qui autrefois limitaient le monde à notre globe. Mais en reculant les limites du monde, nous ne diminuons pas notre grandeur véritable. Sans doute nous paraissons peu de chose dans cette immensité de l'univers, mais plus le monde est grand par rapport à nous, plus il nous faut d'intelligence pour comprendre ces merveilles, plus il a fallu de génie pour les découvrir. Dieu seul peut comprendre parfaitement son œuvre : heureux le mortel qui peut en avoir une idée assez exacte pour en admirer la grandeur et la beauté !

§ III. — *Coup d'œil relatif à la distribution des étoiles dans l'espace.*

Les étoiles sont distribuées en groupes formant des systèmes semblables à celui auquel nous appartenons. Les lois de l'attraction produisent et régissent le mouvement de ces astres lointains, aussi bien que la circulation des planètes autour du Soleil. Les sys-

tèmes les plus simples constituent les étoiles doubles ou triples; ce sont autant de Soleils ayant leurs cortéges de planètes qui décrivent autour d'eux des orbites elliptiques. Ces planètes ne diffèrent des nôtres qu'en un seul point : elles sont encore incandescentes, et par conséquent lumineuses par elles-mêmes; elles nous éclairent par une lumière qui leur est propre, et non par une lumière empruntée venant se réfléchir à leur surface. C'est cette circonstance qui nous permet de les distinguer à une aussi grande distance, d'observer les positions qu'elles occupent successivement, et de calculer les orbites qu'elles décrivent.

Ont-elles aussi des satellites obscurs? Il est naturel de le supposer. Les irrégularités observées dans le mouvement propre de Sirius ont fait soupçonner pendant longtemps l'existence d'un astre semblable circulant autour de cette magnifique étoile. Dernièrement on a découvert ce satellite; mais il est lumineux par lui-même, et son éclat égale au moins celui d'une étoile de sixième grandeur. Ce qui a retardé sa découverte, et ce qui le rend très-difficile à apercevoir, c'est l'éclat de l'étoile principale dont les rayons masquent ordinairement le peu de lumière qu'il nous envoie.

Une autre étoile, Algol (β de Persée), nous prouve directement l'existence des satellites obscurs, par les variations régulières qu'elle subit, et qui ne peuvent être que des occultations produites par un corps opaque passant devant l'astre lumineux. La période de ces variations est de $2^j\,20^h\,48^m\,58^s$. Pendant 2^j et 13^h, l'éclat est constant, et fait ranger cette étoile parmi

celles de deuxième grandeur; puis elle commence à pâlir, et au bout de 3h 30m, elle se trouve réduite au-dessous de la quatrième grandeur; elle demeure dans cet état pendant 5 ou 6 minutes au plus, et elle met à recouvrer son éclat primitif un temps égal au précédent, 3h 30m. Ces variations sont des phénomènes en tout semblables à nos éclipses; on le supposait depuis longtemps, mais les dernières découvertes spectroscopiques l'ont pleinement démontré, car les variations de cette étoile ne peuvent pas, comme celles de beaucoup d'autres, être attribuées à des changements survenus dans le pouvoir absorbant de son atmosphère.

Il ne suffit pas que deux étoiles paraissent très-voisines pour constituer ce qu'on désigne plus spécialement sous le nom d'*étoile double;* il faut de plus qu'elles soient réellement assez voisines pour s'influencer l'une l'autre par la gravitation et former un système à part. Jusqu'à présent il n'y a que quinze de ces systèmes qui soient assez bien connus pour qu'on ait pu déterminer complétement leurs révolutions et calculer les éléments de leurs orbites; mais il y en a un bien plus grand nombre dont on peut affirmer avec certitude la connexion physique. Ainsi, de 1321 étoiles doubles observées par Struve et revues à l'Observatoire du Collége Romain, on en a trouvé un tiers ayant un mouvement relatif certain et très-remarquable. Le nombre des systèmes binaires et ternaires ira en croissant avec le temps, le seul élément qui manque actuellement aux astronomes, et dont ils ne peuvent pas disposer à leur gré. Il n'y a guère qu'un demi-siècle qu'on a commencé à faire sur ce sujet de

bonnes observations, et déjà on a vu plusieurs de ces Soleils accomplir une révolution tout entière: (ζ d'Hercule, 36 ans; η de la Couronne boréale, 43 ans; ζ du Cancer, 59 ans; ξ de la Grande Ourse, 63 ans). Il y a d'autres étoiles qui emploient un temps plus long à accomplir leurs révolutions. Le compagnon de α du Centaure a une orbite à peu près semblable à celle de la comète de Halley. Comme on connaît la distance de cette étoile, on a calculé que la masse de ce système n'est guère différente de celle de notre système solaire.

Les *fig.* 126 et 127 représentent les orbites apparentes de ξ de la Grande Ourse, et de ζ d'Hercule.

Fig. 126.

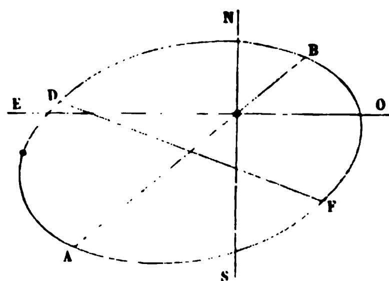
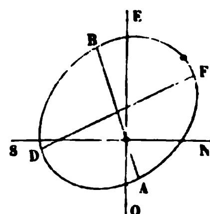


Fig. 127.



Les systèmes binaires présentent deux particularités remarquables : 1° leurs orbites sont ordinairement très-allongées, ce qui peut conduire à des idées théoriques sur leurs modes de formation; 2° les deux étoiles ont presque toujours des couleurs complémentaires, ce qui indique une différence de température et un état différent de condensation.

Outre ces systèmes plus simples, il y a des amas

globulaires, connus en anglais sous le nom de *clusters*, composés d'une multitude littéralement innombrable de petites étoiles dont la densité croît près du centre d'une manière prodigieuse, sans que cependant ces astres cessent d'être distincts, comme on s'en est assuré par les observations faites avec le spectroscope. La *fig.* 128 représente celui qui se trouve dans le Ver-

Fig. 128.



seau. Il est à remarquer que les plus beaux amas globulaires se trouvent dans la zone des grandes étoiles; il semble que leur formation tient la place d'une de ces étoiles plus voisines de nous.

Enfin, il y a dans le ciel des groupes d'étoiles qu'il est impossible de ne pas reconnaître comme formant des systèmes d'astres physiquement reliés ensemble, par exemple les Pléiades, le groupe du Cancer, celui

de Persée (*fig.* 129); certains espaces nébulaires très-

Fig. 129.



vastes, comme la chevelure de Bérénice, les nuées de Magellan, et surtout la voie lactée.

Nous ne pouvons connaître en détail le mode de groupement de ces amas, ni déterminer le centre autour duquel s'exécutent leurs mouvements, car il faudrait pour cela de longues observations qui nous font défaut. Quant à la région plus voisine de nous qui forme la voie lactée, nous pouvons sonder sa profondeur dans les différentes directions, et nous faire une idée assez exacte de la manière dont les étoiles y sont groupées. Impossible, il est vrai, de résoudre cette question directement, ni d'évaluer la distance des étoiles avec des unités connues; mais nous pou-

vons atteindre le résultat avec une certaine approximation par un calcul de moyenne fondé sur la théorie des probabilités.

Les étoiles, sauf deux ou trois exceptions, n'ont pas de parallaxe sensible, d'où il faut conclure que, vu la distance où elles se trouvent, leur lumière met en moyenne une trentaine d'années à parvenir jusqu'à nous. Nous devons donc renoncer à mesurer leurs distances absolues, et nous contenter d'apprécier leurs distances relatives.

On peut employer deux méthodes pour mesurer ces distances relatives : on peut d'abord mesurer l'intensité de la lumière qu'elles nous envoient, ce qui constitue la *méthode photométrique;* on peut, en second lieu, étudier le rapport qui existe entre leurs mouvements propres. Ces deux moyens étant indépendants l'un de l'autre et fondés sur des lois géométriques différentes, s'il arrive qu'elles conduisent à des résultats semblables, nous trouverons dans cette concordance une raison très-grave de croire à l'exactitude des conclusions.

L'estime des distances par la photométrie repose sur deux principes : 1° les étoiles ne peuvent être placées toutes à la même distance de nous; 2° les plus éloignées, doivent, par cela seul, nous paraître plus petites. Ces principes nous conduiraient même à l'appréciation directe et certaine de leurs distances relatives, si nous pouvions affirmer que toutes les étoiles ont une lumière intrinsèque égale; mais cette troisième assertion n'est ni prouvée ni probable. Nous devons donc traiter le problème par les méthodes empruntées au calcul des probabilités. Les résultats

auxquels nous parviendrons seront vrais pour l'immense majorité des étoiles, quoiqu'ils puissent se trouver en défaut pour quelques-unes d'entre elles; car, dans la moyenne, les exceptions se détruiront l'une l'autre. Supposons, par exemple, que deux étoiles paraissent être de la même grandeur, tandis qu'elles sont réellement inégales; on attribue à la plus grande une distance trop petite, et une distance trop grande à celle qui a moins d'éclat; il y aura donc compensation.

Avant d'aborder la question en elle-même, les astronomes ont dû résoudre un problème préliminaire: *Étant donnée une étoile d'une grandeur déterminée, de combien devra-t-on augmenter sa distance pour que son éclat diminue d'une unité dans l'ordre des grandeurs?*

La classification qu'on trouve dans tous les Catalogues est complétement arbitraire et de pure convention; aussi n'en peut-on rien déduire tant qu'on n'aura pas mesuré le pouvoir lumineux de chaque ordre, tant qu'on n'aura pas déterminé la loi physique contenue dans cette classification arbitraire, et exprimé numériquement l'intensité relative de la lumière qui caractérise chaque grandeur. En employant des méthodes photométriques très-ingénieuses, les astronomes sont arrivés à cette conclusion: En moyenne, deux étoiles prises dans deux ordres consécutifs de grandeur ont des intensités lumineuses dont le rapport est égal à 2,42. Les étoiles de la première et de la seconde grandeur font exception, car, pour elles, le rapport est 3,75. En prenant la valeur moyenne 2,42, on a pu calculer les distances auxquelles devrait

être placée une étoile de première grandeur pour avoir le même éclat que les étoiles de deuxième grandeur, de troisième grandeur, etc. Les résultats de ce calcul sont contenus dans le tableau suivant :

GRANDEURS.	DISTANCES.	GRANDEURS.	DISTANCES.
1	1,00	9	34,30
2	1,55	10	53,36
3	2,42	11	83,00
4	3,76	12	129,12
5	5,86	13	200,90
6	9,11	14	312,50
7	14,17	15	486,10
8	22,01	16	736,20

La seizième grandeur contient les plus petites étoiles visibles dans le grand télescope d'Herschel, qui, avec son ouverture de 18 pouces, équivaut en *force pénétrante* à un réfracteur de 25 centimètres.

Essayons de nous faire une idée des distances absolues de ces étoiles. En supposant une étoile assez éloignée pour que sa lumière mette dix ans à nous arriver, sa parallaxe serait représentée par un tiers de seconde, quantité sans doute exagérée pour les étoiles de première grandeur. Alors, les plus petites étoiles visibles dans notre réfracteur seraient situées à une si grande distance, que leur lumière mettrait sept mille cinq cent soixante ans à parvenir jusqu'à nous. Il suit de là que, dans le réflecteur de lord Ross, la limite des distances serait représentée par 2090 unités, et, pour parcourir cette distance, la lumière emploierait vingt mille neuf cents ans.

On a cherché à déterminer la distance relative des étoiles de différentes grandeurs, d'après l'amplitude

de leurs mouvements propres. Struve a fait sur ce sujet un travail très-remarquable auquel nous empruntons les résultats suivants :

GRANDEUR des étoiles.	MOUVEMENT PROPRE EN 100 ANS.			
	ÉTOILES SIMPLES.		ÉTOILES DOUBLES.	
	En ascension droite.	En déclinaison.	En ascension droite.	En déclinaison
1	34″,2	29″,0	55″,5	47″,9
2	18,2	16,1	30,8	26,1
3	12,2	10,5	20,1	17,0
4	8,7	7,4	14,4	12,0
5	6,3	5,3	10,2	8,6
6	3,7	3,1	6,0	5,1
7	2,2	2,8	3,5	3,0
8	1,4	1,2	2,3	2,0
9	1,0	0,9	1,7	1,5

Ce tableau révèle une circonstance singulière, c'est que les étoiles doubles ont des mouvements plus prononcés. La cause de cette singularité réside dans l'impulsion plus considérable que ces systèmes ont reçue à l'origine et qui les a forcés à se diviser en plusieurs parties.

Comme les mouvements apparents sont en raison inverse des distances, on pourra calculer la distance relative des étoiles, en prenant celle de la première grandeur pour unité. Le tableau suivant contient la comparaison des résultats obtenus par l'étude des mouvements propres et par la méthode photométrique.

GRANDEUR des étoiles.	DISTANCES CONCLUES		
	PAR LES MOUVEMENTS PROPRES.		PAR LA PHOTOMÉTRIE.
	Étoiles simples.	Étoiles doubles.	
1	1,0	1,0	1,0
2	1,3	1,4	1,5
3	2,1	2,0	2,4
4	3,6	3,2	3,7
5	6,1	5,9	5,8
6	8,5	8,2	9,1
7	12,0	11,6	14,2
8	17,9	17,8	22,0
9	33,3	31,8	34,3

De ce tableau il résulte que la progression est extrêmement semblable de part et d'autre, et l'on ne devait pas s'attendre à un accord plus parfait entre des éléments aussi disparates. Il y a un peu d'incertitude pour les mouvements propres des étoiles de neuvième grandeur, et c'est là ce qui explique la différence notablement plus grande qu'on trouve dans les résultats.

Lorsque nous voulons, de la disposition apparente, conclure à la distribution réelle des étoiles dans l'espace, nous quittons le domaine de l'observation et nous entrons forcément dans celui des hypothèses. Or il se présente deux manières d'expliquer les résultats observés : 1° on peut supposer que, si l'on voit plus d'étoiles dans une direction que dans une autre, cela tient uniquement à leur condensation, la profondeur de la couche restant la même dans tous les cas; 2° on peut admettre, au contraire, que la couche est

plus profonde dans une direction que dans l'autre, la densité étant la même de toutes parts.

La solution de cette question demande la connaissance préliminaire de la manière dont les petites étoiles sont distribuées dans le ciel. Ce travail a été fait par les deux Herschel, William pour l'hémisphère nord, et sir John pour le sud. Il est absolument impossible qu'un homme exécute à lui seul une semblable énumération; elle lui demanderait près d'un siècle de travail soutenu. Pour arriver au résultat, W. Herschel a substitué à l'énumération continue le procédé des *sondes* (*star gauges*) distribuées sur le ciel d'une manière uniforme. Ces opérations consistaient à compter les étoiles visibles dans un réflecteur de 18 pouces, auquel était adapté un oculaire qui lui donnait un champ de vision égale à 15 minutes. Ces sondes ont donné des résultats extraordinairement différents. Dans quelques endroits, près du pôle de la voie lactée, on comptait 3 ou 4 étoiles à chaque observation, tandis que, dans la voie lactée elle-même, ce nombre s'est élevé jusqu'à 588.

En discutant ces observations, on est arrivé à quelques conclusions générales que nous allons exposer brièvement :

1° Les étoiles sont d'autant plus nombreuses qu'on s'approche davantage de la voie lactée; le maximum a lieu dans le plan de cette nébuleuse, le minimum à ses pôles.

2° Dans la voie lactée elle-même, l'accumulation est plus grande pour les points voisins de l'Aigle (18 heures d'ascension droite) que dans le voisinage

du Taureau (6 heures). D'un côté le maximum est de 557, de l'autre il est seulement de 204.

3° La densité apparente décroît très-rapidement quand on s'éloigne de la voie lactée. A une distance de 2 degrés elle est encore très-considérable; à 15 degrés, le nombre d'étoiles correspondant à une sonde descend à 56; à 30 degrés il est de 17; à 45 degrés il est de 10; entre 60 et 70 degrés, on ne trouve plus que 6 ou 4 étoiles.

4° En calculant d'après ces sondes le nombre des étoiles visibles dans le télescope d'Herschel, on trouve le nombre 20374034.

Ces résultats, confirmés par les travaux de plusieurs astronomes, permettent d'établir avec une assez grande probabilité la loi de la distribution réelle des étoiles dans l'espace. Nous avons dit qu'il y a deux hypothèses possibles. Dans le but de reconnaître laquelle des deux est la véritable, on a calculé par deux méthodes différentes le rayon de la sphère dans laquelle doivent être renfermées les étoiles de chaque grandeur. Dans un premier calcul, on a supposé la distribution uniforme; dans un autre, au contraire, on a supposé la densité variable. En comparant les nombres ainsi obtenus avec les distances calculées par les deux méthodes précédentes, on choisira l'hypothèse dont les résultats s'accordent mieux avec les nombres déjà trouvés. Voici le tableau où se trouvent résumés ces calculs :

GRANDEUR des étoiles.	DISTANCES CONCLUES		
	1° De la distribution uniforme.	2° En supposant la densité variable.	Des méthodes précédentes.
1	1,00	1,00	1,00
2	1,46	1,80	1,55
3	2,13	2,76	2,42
4	2,91	3,90	3,76
5	3,98	5,45	5,86
6	5,46	9,28	9,11
7	8,58	15,78	14,17
8	13,44	23,86	22,04
9	20,38	33,40	34,30
14 (Herschel).	98,00	180,40	312,00

Nous voyons que, pour les plus grandes étoiles, les résultats donnés par l'hypothèse de la distribution uniforme ne sont pas déraisonnables; mais, à partir de la quatrième grandeur, les divergences deviennent très-grandes, et plus loin elles sont énormes. Il en est tout autrement des nombres calculés d'après l'autre hypothèse, comme on peut s'en assurer en comparant les deux dernières colonnes. La conclusion que nous devons légitimement tirer de cette remarque, c'est que la couche stellaire non-seulement semble posséder, mais possède réellement une densité plus considérable dans la voie lactée que dans le reste du ciel.

Notre Soleil n'est pas placé au milieu de la couche qui constitue la voie lactée; sa position est même très-excentrique. D'abord, la voie lactée ne traçant pas un grand cercle sur la sphère céleste, il en résulte que nous nous trouvons à une certaine distance, 4 degrés environ, du plan moyen qui la contient. Outre cela, la

projection du Soleil sur ce plan moyen est loin d'occuper le milieu de la voie lactée; de là vient que, dans le Sagittaire et dans l'Aigle, la densité apparente de la couche stellaire est beaucoup plus considérable qu'à l'autre extrémité du même diamètre. Du côté du Sagittaire, la voie lactée est absolument insondable, le fond du ciel est formé par une véritable poussière stellaire, et, dans le champ des plus puissants instruments, cette poussière reste projetée sur un fond blanc. Ce fond blanc peut être en partie composé de matière nébulaire, mais comme cette matière possède nécessairement un certain pouvoir absorbant, elle doit à coup sûr arrêter beaucoup de rayons lumineux, et nous empêcher de voir un grand nombre d'étoiles plus éloignées.

Il faut conclure de toutes ces considérations que la profondeur des cieux est réellement insondable et que nous n'en connaîtrons jamais les bornes. Il est probable que la réunion des grandes étoiles qui environnent notre Soleil n'est qu'un des amas qui forment la voie lactée, et que, vu d'une certaine distance, cet amas nous apparaîtrait comme une tache plus blanche dans la voie lactée elle-même.

En arrivant à cette limite, nous sentons notre imagination confondue. En vain chercherions-nous à accumuler comparaison sur comparaison pour donner une idée de cette immensité. Nous pouvons entasser les chiffres, multiplier les zéros, et, pour abréger, exprimer ces distances par des nombres affectés d'exposants; l'abîme n'en reste pas moins impénétrable. Que dire de ces espaces immenses et des astres qui les remplissent? Que penser de ces étoiles qui sont, sans

doute, comme notre Soleil, des centres de lumière, de chaleur et d'activité, destinés, comme lui, à entretenir la vie d'une foule de créatures de toute espèce? Pour nous, il nous semblerait absurde de regarder ces vastes régions comme des déserts inhabités; elles doivent être peuplées d'êtres intelligents et raisonnables, capables de connaître, d'honorer et d'aimer leur Créateur; et peut-être que ces habitants des astres sont plus fidèles que nous aux devoirs que leur impose la reconnaissance envers Celui qui les a tirés du néant; nous voulons espérer qu'il n'y a point parmi eux de ces êtres infortunés qui mettent leur orgueil à nier l'existence et l'intelligence de Celui à qui ils doivent eux-mêmes et leur existence et la faculté de connaître tant de merveilles.

CONCLUSION.

Le long chemin que nous avons parcouru touche désormais à son terme. En étudiant les phénomènes que nous présente le Soleil, nous avons reconnu la constitution physique de cet astre radieux, et la nature chimique des substances qui le composent; nous avons même reconnu des traces de son mode de formation, nous avons pu jusqu'à un certain point entrevoir la place qu'il occupe dans l'univers.

Ce globe enflammé, source de la vie et cause du mouvement sur les planètes, a été jadis une masse nébuleuse semblable à celles que nous voyons dans la profondeur du ciel. Cette masse, en se refroidissant, a donné naissance aux planètes et à leurs satellites.

Elle conserve encore dans son sein toute la chaleur qui a dû résulter de sa condensation et de la chute de ses différentes particules, qui, venant des limites les plus reculées de son domaine, ont obéi à l'attraction en tombant vers le centre.

Cette masse énorme, subissant les phases de refroidissement par lesquelles ont passé les planètes qui l'environnent, pourra un jour se trouver complétement dépouillée de l'éclat dont elle brille aujourd'hui; mais il s'écoulera encore des millions et des millions d'années avant qu'elle devienne incapable d'agir efficacement pour entretenir la force et la vie autour d'elle. Y aura-t-il une cause quelconque dont l'action doive alors rétablir les choses dans leur état primitif? Nous ne saurions le dire. Le monde n'a pas toujours existé et rien ne nous prouve qu'il doive exister toujours.

La constitution gazeuse du Soleil nous explique les phénomènes que nous observons à sa surface. La partie qui reste extérieurement exposée à la radiation vers les espaces célestes perd l'état gazeux en se refroidissant; elle reste condensée sous forme de masses vaporeuses, mais incandescentes, dans l'atmosphère gazeuse et transparente dont le globe est environné, formant une couche brillante que nous appelons la *photosphère*. Cette couche, ainsi que l'intérieur du corps solaire lui-même, est le siége de vastes opérations chimiques et de mouvements physiques très-compliqués. Des causes encore inconnues, transportant des masses considérables de l'intérieur vers l'extérieur, produisent d'immenses lacunes dans la couche lumineuse, et donnent ainsi naissance aux taches; le

centre de ces lacunes, plus obscur et plus absorbant, nous intercepte la plus grande partie des rayons lumineux qui émanent du noyau central, composé d'une matière gazeuse et complétement dissociée.

Au-dessus de la couche lumineuse se répand l'atmosphère formée de vapeurs transparentes qui s'élèvent, selon leurs poids spécifiques, à différentes hauteurs. De toutes ces substances l'hydrogène est la moins dense; aussi flotte-t-il à une grande hauteur, formant des colonnes et des nuages qui constituent les protubérances roses observées autour du Soleil pendant les éclipses. Le fer et le calcium sont les matières les plus abondantes au fond des taches et dans les déchirures de la photosphère.

L'atmosphère du Soleil est très-vaste; elle s'étend à une distance qui est bien égale au quart du rayon solaire; elle a une forme elliptique, son élévation étant moins grande aux pôles qu'à l'équateur. Dans les régions équatoriales, et surtout dans celles où se présentent les taches, on observe une activité plus grande qu'aux pôles, activité qui se manifeste par un éclat plus grand, et par une hauteur plus considérable de la couche atmosphérique elle-même.

Le spectroscope, en nous révélant la composition chimique du Soleil, nous a montré que les substances dont il est formé sont identiques avec celles qui constituent les corps terrestres. Et cependant, nous sommes encore bien loin de connaître la nature de toutes ces substances.

Telles sont, résumées dans un aperçu général, les connaissances que nous possédons sur l'astre du jour. Ces connaissances sont bien incomplètes, il est vrai;

et cependant, si nous considérons la rapidité avec laquelle se succèdent les grandes découvertes relatives au Soleil, nous serons fiers d'appartenir à une génération qui, à elle seule, a plus avancé dans cette voie que toutes les générations qui l'ont précédée. Le dernier mot n'est pas dit, mais on peut bien espérer que les découvertes à venir, loin de détruire aucune des parties de l'œuvre actuellement accomplie, continueront le travail déjà commencé, le compléteront, et résoudront les nombreux problèmes dont nous avons indiqué l'énoncé dans ce livre. Le travail patient de l'observation, les expériences habilement dirigées pour contrôler les théories et les hypothèses finiront par éclaircir ce qui est encore douteux ou incertain.

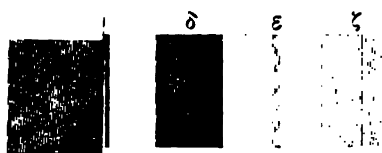
Il nous reste beaucoup de choses à apprendre, car la nature est inépuisable dans ses merveilles ; lorsque l'on croit arriver au terme, on n'est encore qu'au début, et l'histoire même du Soleil nous fournit une preuve frappante de cette vérité.

Le champ serait bien plus vaste et plus inépuisable si nous voulions nous occuper des influences merveilleuses que cet astre bienfaisant exerce sur la Terre, puisque ses rayons, doués du pouvoir d'éclairer, d'échauffer et d'agir sur les molécules des corps, sont la cause première d'où découlent, sur toutes les planètes, et la force et la vie. Lorsqu'on se borne à considérer le Soleil comme le centre géométrique des orbites que décrivent les planètes, on se fait une bien pauvre idée de l'action qu'il exerce dans le monde et de son importance dans la création. Mais, lorsque l'on considère son influence physique, chimique et physiologique, on se trouve en présence d'une foule

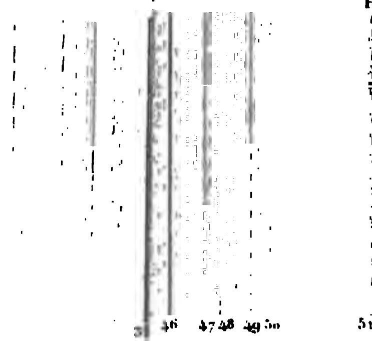
de questions mystérieuses et de problèmes non résolus, dont l'étude suffira, sans doute, à exercer l'activité de plusieurs générations. Les forces qu'il met en jeu sont d'un ordre plus élevé que l'attraction elle-même, et leur nature intime est tout aussi inconnue que celle de la gravitation. Nous n'avons pas pu entrer dans l'étude spéciale de ces relations, mais nous ne devions pas les laisser complétement de côté. La nature de cet Ouvrage nous a permis à peine d'en dire quelques mots; peut-être un jour pourrons-nous traiter ces questions d'une manière plus sérieuse et plus approfondie.

FIN.

PL. 1.

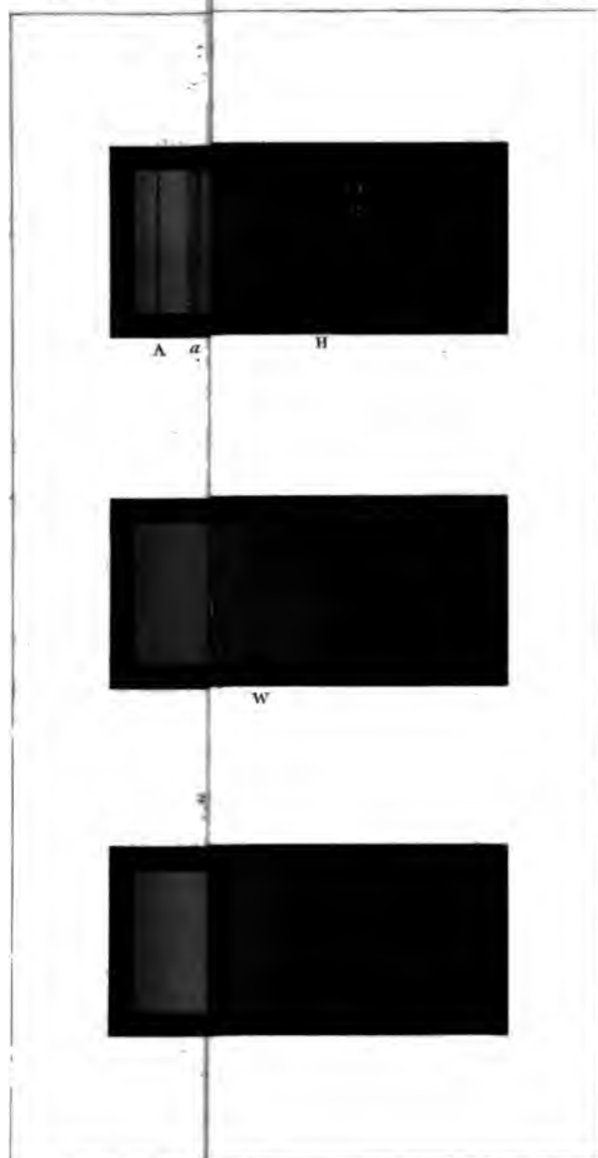


(... Willingen.)



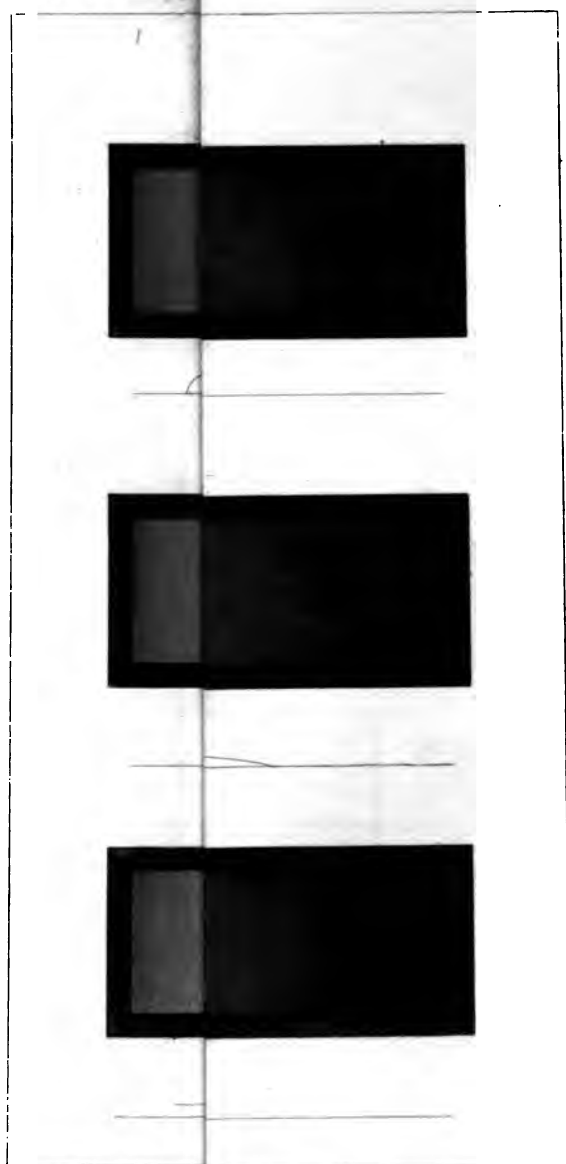
L. Éditeur, Paris. Dulos sc.

Pl. II.



Sarazin imp. r. Git-le-Cœ

Dulos sc.



Sarazin imp. r. Gît-le-Cœur *Dulos sc.*







